

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра радиофизики

Направление «Прикладные математика и физика»



# ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, СОЗДАВАЕМЫХ АВАРИЙНЫМИ ТОКАМИ, НА ОТКЛЮЧЕНИЕ ПРИВОДА С МАГНИТНОЙ ЗАЩЕЛКОЙ

Бакалаврская работа студента  
дневного отделения

\_\_\_\_\_ **Посуховской Виктории Андреевны**

Научный руководитель:  
\_\_\_\_\_ ст. преп. **Шапошников А.М.**

Рецензент:  
\_\_\_\_\_ к. т. н., ст. науч. сотр. ИЭЭ РАН **Павлов А.В.**

Санкт-Петербург  
2017

## Оглавление

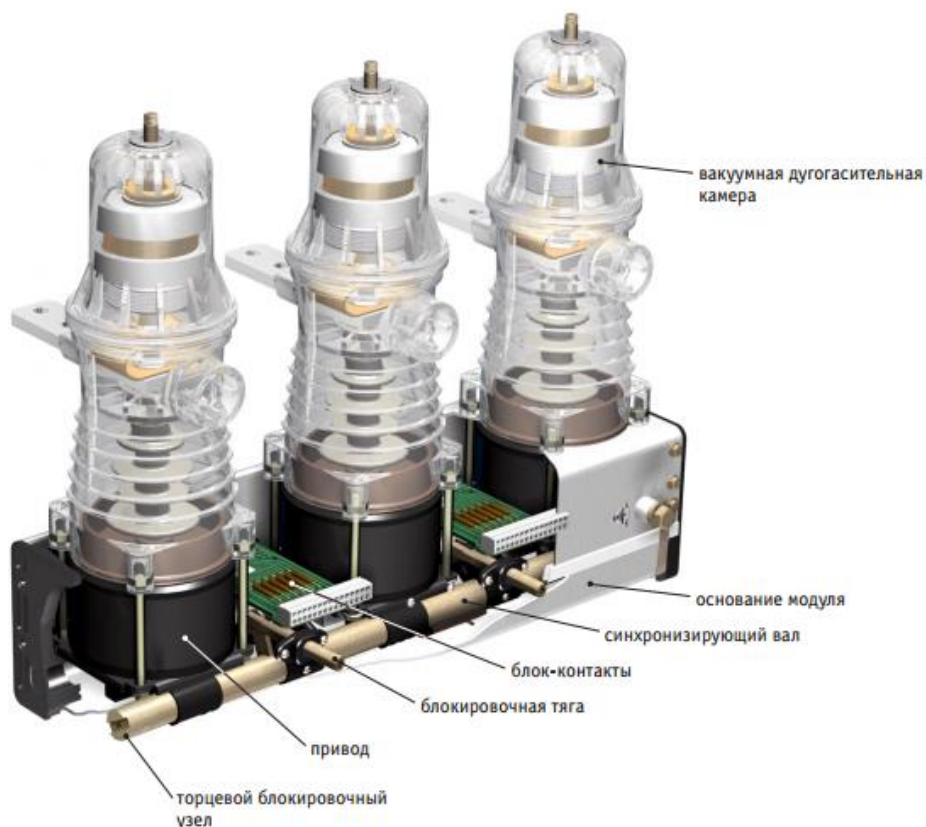
1	Введение .....	3
2	Обзор литературы .....	6
3	Постановка задачи .....	9
3.1	Устройство и принцип работы ЭМП .....	9
3.2	Система уравнений .....	11
3.3	Численная модель .....	12
4	Намагничивание ЭМП .....	13
5	Влияние внешнего магнитного поля на ЭМП .....	20
5.1	Влияние внешнего стационарного магнитного поля на ЭМП .....	20
5.2	Влияние внешнего импульсного магнитного поля на ЭМП .....	24
5.2.1	Влияние внешнего импульсного магнитного поля на ЭМП с разомкнутой катушкой .....	24
5.2.2	Влияние внешнего импульсного магнитного поля на ЭМП с замкнутой накоротко катушкой .....	37
6	Трёхмерная постановка задачи .....	42
7	Выводы .....	49
8	Список литературы .....	50

## 1 Введение

В высоковольтных электросетях возникают ситуации, когда необходимо размыкать или замыкать участки цепи. Для этой цели предусмотрены высоковольтные выключатели, которые и служат для коммутации электрического тока. Необходимость размыкания контактов возникает при изменении действующей схемы или ликвидации аварий. Для корректной работы высоковольтного выключателя должна присутствовать возможность быстрого автоматического и механического контроля процессов включения и отключения. Также задачей высоковольтного выключателя является обеспечение непрерывного протекания электрического тока в номинальном режиме. Процессы замыкания и размыкания цепи сопровождаются возникновением электрической дуги между контактами, поэтому для ее гашения предназначена вакуумная дугогасительная камера (ВДК). Гашение может происходить в различных средах: воздухе, масле, элегазе, вакууме. По этому признаку различают виды высоковольтных выключателей.

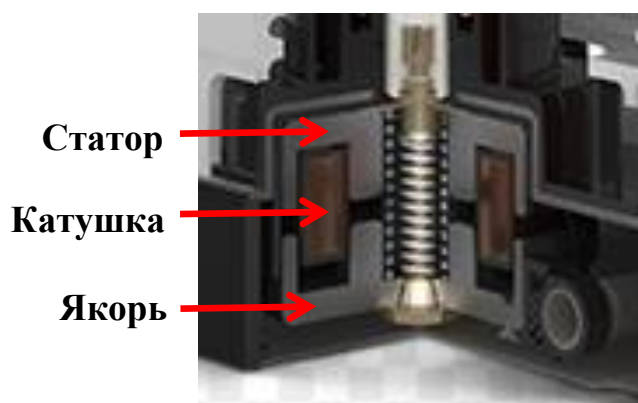
К основным преимуществам вакуумных выключателей относят высокую надежность и износостойкость, низкие затраты на обслуживание, отсутствие необходимости обслуживания контактов вакуумной камеры, компактный размер.

Конструкцию трехфазного вакуумного выключателя (рис. 1) составляют три одинаковых полюса, соединенные синхронизирующим валом. Особенностью полюса является расположение на одной оси ВДК и электромагнитного привода (ЭМП). Главные контакты, расположенные в ВДК, составляют верхний неподвижный электрод и нижний электрод, соединенный тяговым изолятором с ЭМП, который контролирует движение электрода, за счет чего и происходит размыкание электродов в ВДК.



*Рис. 1. Вакуумный выключатель.*

Работа ЭМП основана на осуществлении преобразования электромагнитной энергии в механическую. Конструкция ЭМП включает в себя катушку и магнитную систему, состоящую из подвижной (якорь) и неподвижной (статор) частей (рис. 2). При пропускании электрического тока через катушку формируется магнитное поле в пространстве, под действием которого якорь движется к статору. Ток на катушку подается от блока управления, содержащего батарею конденсаторов. Магнитная система выполняется из ферромагнитных материалов.



*Рис. 2. Конструкция ЭМП, находящегося в разомкнутом состоянии.*

ЭМП обеспечивает включенное положение главных контактов коммутационного модуля при замкнутом состоянии магнитной системы и отключенное – в разомкнутом.

Согласно нормирующим стандартам вакуумный выключатель во включенном состоянии должен быть устойчив к внешним воздействиям, которые могут препятствовать его исправной работе. Во включенном положении коммутационного модуля через элементы главной цепи (рис. 3) протекает электрический ток, создающий магнитное поле вокруг проводников. Величина магнитного поля напрямую зависит от величины протекающего тока. Поэтому большой интерес представляет ситуация протекания токов короткого замыкания, которые образуют сильные магнитные поля. Номинальный ток отключения короткого замыкания может составлять около 20 кА, а электродинамической стойкости — 50 кА. В связи с близостью расположения ЭМП и токоведущих шин магнитное поле может размагнитить ЭМП, из-за чего произойдет его несанкционированное отключение.

Для проверки соответствия существующим стандартам по электродинамической стойкости проводят квалификационные испытания. При этом обеспечивают протекание токов короткого замыкания через главные цепи, чтобы конфигурация созданного магнитного поля была наиболее жесткой по отношению к коммутационному модулю. Для успешного прохождения подобных испытаний ЭМП не должен разомкнуться и отключить коммутационный модуль.

В связи с большим разнообразием геометрии ошиновок и ЭМП проведение таких ресурсоемких экспериментов затруднено. Поэтому для упрощения проведения испытаний предварительно необходимо провести расчет воздействия внешним магнитным полем (МП) на ЭМП. Наиболее удобным способом такого расчета является численное моделирование, которое позволит оценить зависимость влияния МП разной конфигурации на параметры (распределение магнитной индукции в системе и силу удержания) ЭМП.

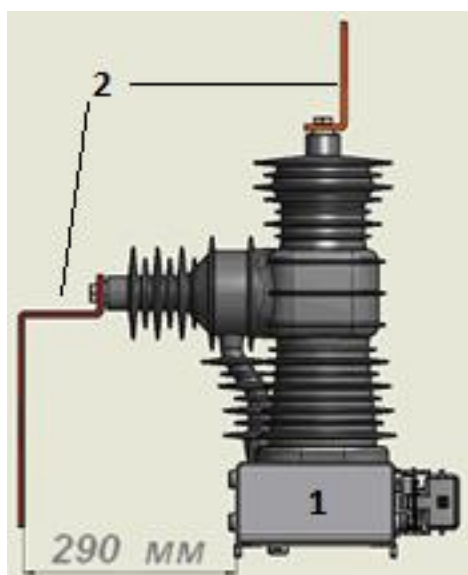


Рис. 2. Коммутационный модуль.  
1 – место расположения ЭМП, 2 – токоведущие шины.

**Целью настоящей работы** является изучение влияния внешнего магнитного поля на параметры (распределение магнитной индукции, поля, магнитная сила) ЭМП.

Для выполнения поставленной цели было произведено решение ряда задач методом конечных элементов, позволяющее по заданной геометрии ЭМП, известному состоянию остаточной намагниченности и параметрам внешнего магнитного поля рассчитать изменение силы удержания ЭМП.

#### **Задачи работы:**

- моделирование «упрощенного» процесса намагничивания ЭМП (постановки на магнитную защелку), соответствующего реальному включению ЭМП с использованием двухимпульсной схемы включения (замыкание катушки на батарею конденсаторов, пауза, домагничивание ЭМП током от батареи);
- моделирование воздействия внешним магнитным полем на включенный ЭМП:
  - влияние стационарного однокомпонентного внешнего магнитного поля;
  - влияние импульсного однокомпонентного внешнего магнитного поля;
  - сравнение влияния стационарного внешнего магнитного поля разных пространственных компонент;

К особенностям моделирования относится учет влияния проводимости материала магнитопровода, за счет чего под действием магнитного поля в нем возникают индуцированные токи, препятствующие изменению магнитного потока. Индуцированный ток оказывает влияние на распределение магнитного поля, таким образом воздействуя на конечное распределение магнитных полей в ЭМП. Не менее важным явлением для ферромагнетиков оказывается магнитный гистерезис. Этот нелинейный эффект проявляется зависимостью магнитной индукции от магнитного поля, причем учитывается как текущая намагниченность материала, так и его предыстория. Учет гистерезиса позволяет рассчитать остаточную «намагниченность» (пространственное распределение полей  $B, H$  при выключении тока) магнитной системы ЭМП и остаточную магнитную силу, действующую между якорем и статором. Поэтому в текущей работе необходимо учитывать этот эффект.

## **2 Обзор литературы**

Современная литература насчитывает большое количество исследований, связанных с работой ЭМП. В статьях [1, 2, 3, 4] основным объектом изучения являются ЭМП или приводы с постоянными магнитами.

В статье [1] рассчитывают внешнее магнитное поле, создаваемое клапаном с ЭМП. Авторы отмечают отрицательное влияние внешнего магнитного поля на работу элементов

автоматических устройств, электронных устройств: приборов, линий связи и компьютерных комплексов. Рассматривается вклад магнитного поля, индуцированного электрическим током в обмотке ЭМП, и поля, возникающего вследствие намагниченности ферромагнетика, а также произведен учет намагниченности в магнитном поле Земли. В качестве магнитных свойств использована безгистерезисная кривая намагничивания. В ходе работы была получена аналитическая формула для расчета внешнего магнитного поля, использовалось упрощение геометрии клапана до формы цилиндра.

Исследование [2] проведено на основе намагничивания ЭМП электрическим током в катушке для сравнения разных методов решения. Авторы используют двумерное и трехмерное конечно-элементное моделирование, сравнивают его с полуаналитическими методами динамической магнитной схемы замещения и статической магнитной схемы замещения (последний метод используется в сочетании с комплексной моделью импеданса). Впоследствии каждый из способов сравнивается с экспериментальными результатами, выполненными посредством измерения силы притяжения якоря к статору ЭМП. Наиболее точным авторы признают трехмерный конечно-элементный метод численного моделирования, но отмечают его основным недостатком длительность времени решения.

Что касается воздействия внешним магнитным полем, это явление распространено в различных областях промышленности для преследования различных целей.

Воздействия внешними магнитными полями эффективны в дефектологии, когда необходимо определить параметры и месторасположение дефекта по величине намагниченности без разрушения изделия. В статьях [5, 6] воздействуют внешними магнитными полями на ферромагнитные конструкции с целью неразрушающего контроля.

Также многие авторы отмечают отрицательное влияние магнитного поля на исследуемые объекты [4, 7]. Поэтому основные исследования по влиянию внешними магнитными полями проводят с целью оптимизации работы конкретных устройств (в связи с их близким расположением к источникам внешнего магнитного поля).

Работы [8, 9] изучают механическое поведение объектов, а именно проводят исследования на динамическую стойкость к внешним воздействиям магнитными полями. Также проводят разработки защитных экранов от негативного влияния воздействий внешними магнитными полями. Такой расчет провели авторы статьи [7]. Также проводят исследования влияния внешнего магнитного поля на термоустойчивость различных объектов [4]. Расчеты проводят для магнитных полей различных конфигураций, сравнивают воздействие стационарных и импульсных магнитных полей.

В [5] на полый стержень круглого сечения воздействовали однородным магнитным полем. В результате исследования была получена аналитическая формула распределения

магнитной индукции в стержне. Сравнения полученной формулы с экспериментом показали хорошее сходство.

В работе [6] этих же авторов рассмотрено влияние неоднородного стационарного поля на ферромагнитный диск. Был проведен численный расчет методом пространственного интегрирования. Авторы выделяют в преимуществах этого метода простоту введения в расчет магнитных характеристик и ограничение области расчета объемом ферромагнитного образца. Также нужно отметить, что в расчете нелинейные свойства материала учитывались основной кривой намагниченности. Полученные результаты расчета соответствуют физическим представлениям о явлении и результатам эксперимента, подтверждая корректную применимость используемого метода пространственного интегрирования.

В [10] рассчитывают влияние на цилиндр однородного магнитного поля, направленного поперек оси цилиндра. Способом расчета выбран метод виртуальных поверхностных магнитных зарядов. При этом пренебрегается проводимостью и гистерезисом материала цилиндра.

Статья [3] показывает результаты численного моделирования джоулева нагрева рельсовых электромагнитных ускорителей во внешнем магнитном поле. При превышении точки плавления возможно спаивание металлических частей ускорителя, что негативно влияет на его работу. Внешнее магнитное поле используют для снижения нагрева электромагнитного ускорителя без уменьшения его магнитной силы. Поэтому данная работа исследует влияние магнитного поля на пусковой механизм ускорителя.

Отдельное внимание можно обратить на работу [4]. В статье рассмотрено влияние излучения на линейный привод с постоянным магнитом. Авторы отмечают, что излучение может привести к повреждению магнитов привода. Поэтому в работе обсуждаются эффективные конструкции привода, его размеры и материал для электромагнитной, механической и термической устойчивости к излучению. Описаны факторы, влияющие на стойкость к излучению. Также была рассчитана осесимметричная конечно-элементная модель привода.

В статье [8] отмечают важность исследования влияния внешнего магнитного поля на располагающиеся детали поблизости, а также тесной взаимосвязи между механическими и электромагнитными явлениями. Поэтому авторы исследуют механическое поведение проводящей пластины под действием внешнего поперечного импульсного магнитного поля. Расчет ведется методом конечных элементов, показана важность взаимодействия внешнего магнитного поля и магнитного поля, создаваемого индуцированными токами в пластине.

В работе [9] было проведено аналитическое исследование динамического поведения проводящей диска в нестационарных магнитных полях разных направлений. Получено



решение для вихревого тока в диске, которое показало хорошее согласие с численным расчетом методом конечных элементов.

В исследовании [7] опираются на отрицательное действие внешнего магнитного поля на какие-либо объекты промышленности, а также на человеческий организм. Поэтому авторы предлагают исследовать варианты магнитной защиты для предотвращения негативных последствий от воздействия внешними полями. Работа интересна тем, что авторы сравнивают три различных метода решения: аналитический, двумерное конечно-элементное моделирование и нейронные сети. Рассчитывается эффективность экранирования цилиндрического ферромагнитного экрана под действием поперечного магнитного поля. Помимо сравнения методов между собой, основное сравнение выполняется с экспериментом. Все методы учитывают магнитный гистерезис с помощью эллиптического приближения. В результате сделали выводы, что аналитическая модель работает быстро и наиболее точно в случае слабых нелинейностей материала, а также при умеренном распределении магнитного поля в экране. Конечно-элементная модель работает точно для любых параметров, если размер элементов подобран грамотно для конкретного случая, однако время расчета велико. Самым точным методом оказались нейронные сети. Но этот метод усложнен предварительным обучением, от которого и зависит точность результата.

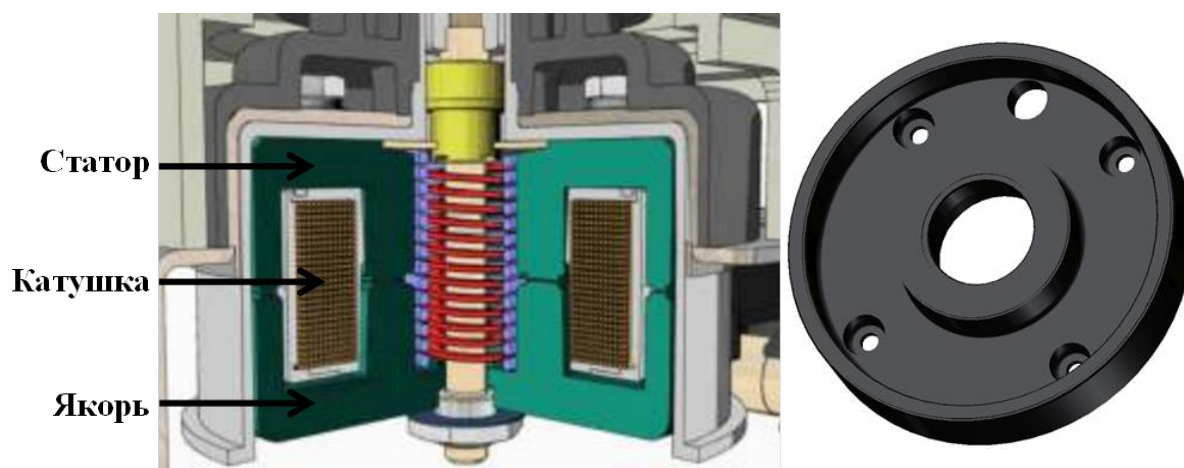
В ходе анализа литературы выяснено, что авторы используют различные методы решения для оценки магнитной индукции в исследуемом объекте, подтверждая сходство решений с экспериментами. Наиболее часто используемым является численный расчет методом конечных элементов из-за оптимального соотношения точности и времени решения [2,3,4,7,8].

Статей о влиянии внешнего магнитного поля на состояние намагниченного ЭМП найдено не было. Хотя значимость этого вопроса описана во введении настоящей работы.

### **3 Постановка задачи**

#### **3.1 Устройство и принцип работы ЭМП**

Рассмотрим устройство и принцип работы симметричного (якорь и статор одинаковой формы) двухразрывного (две поверхности соприкосновения статора и якоря: внутренне и внешнее кольцо) ЭМП вакуумного выключателя (рис. 4).



*Рис. 4. Конструкция ЭМП в поперечном сечении - слева, вид статора (якоря)- справа (синим цветом обозначена пружина отключения, красным – пружина дополнительного поджатия). Замкнутое состояние.*

Для пуска процесса включения вакуумного выключателя (замыкания главных контактов) блок управления разряжает батарею конденсаторов через катушку ЭМП. Батареи конденсаторов, заряженные до определенного напряжения, разряжаются через катушку по двухимпульсной схеме (рассмотрена ниже). Протекание электрического тока в катушке вызывает магнитное поле. В некоторый момент времени якорь начинает двигаться к статору под действием результирующей силы, состоящей из магнитной силы, силы пружин и силы тяжести. Якорь приводит в движение тяговый изолятор и подвижный электрод ВДК. Сжимается пружина отключения, и главные контакты замыкаются. Но якорь еще продолжает движение до соприкосновения с поверхностью статора и сжимает пружину дополнительного поджатия. В конце процесса включения якорь останавливается и удерживается притянутым к статору бесконечно долгое время за счет остаточной магнитной силы, зависящей от остаточной «намагниченности».

Для процесса отключения (размыкание главных контактов) в катушку ЭМП блоком управления подается ток обратной полярности. ЭМП размагничивается (уменьшается магнитная сила вследствие изменения полей В и Н), и под действием силы пружины отключения и поджатия происходит отрыв якоря от статора. Обеспечивается размыкание электродов ВДК.

Также необходимо отметить, что в замкнутом положении ЭМП существует некоторый зазор между статором и якорем, образованный шероховатостью поверхности. Величину зазора напрямую измерить не представляется возможным, по оценочным данным средний зазор равен 10 мкм, это значение будет использоваться в моделировании.

### 3.2 Система уравнений

Для решения поставленной задачи необходимо решить следующую систему уравнений, описывающую электромагнитные процессы:

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \times \vec{H} - \sigma \vec{v} \times \vec{B} = \vec{J}, \quad (1)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}, \quad (2)$$

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}), \quad (3)$$

где  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля,  $\vec{B}$  – индукция магнитного поля,  $\vec{A}$  – векторный магнитный потенциал,  $\vec{J}$  – плотность электрического тока источника,  $\sigma$  – проводимость материала,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\vec{M}$  – намагниченность,  $\vec{v}$  – скорость движения тела.

В уравнении для полного тока (1) члены  $\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$  и  $\sigma \vec{v} \times \vec{B}$  описывают индуцированные токи в материале статора и якоря вследствие изменения магнитного поля и движения проводников электрического тока. Плотность тока в катушке определяется уравнением:

$$\vec{J} = \frac{NI}{S} \vec{e}_{coil}, \quad (4)$$

где  $N$  – число витков в катушке,  $I$  – ток в катушке,  $S$  – площадь,  $\vec{e}_{coil}$  – направление тока.

Уравнение (3) учитывает магнитный гистерезис материала статора и якоря, а зависимость  $M(H)$  рассчитывается с помощью двумерной модели Джилса-Атертона [11]:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \frac{\left(\frac{\vec{\chi}}{|\vec{\chi}|}\right) M_{sx} (\vec{\chi} \vec{H}_{eff})^+ + c d \vec{M}_{an}}{dt}, \quad (5)$$

$$M_{anx} = M_{sx} \left( cth \left( \frac{|\vec{H}_{eff}|}{a_x} \right) - \frac{a_x}{|\vec{H}_{eff}|} \right) \frac{\vec{H}_{eff}}{|\vec{H}_{eff}|}, \quad (6)$$

$$\vec{H}_{eff} = \vec{H} + \hat{\alpha} \vec{M}, \quad (7)$$

$$\vec{\chi} = \hat{k}^{-1} (\vec{M}_{an} - \vec{M}), \quad (8)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, определяющий междоменную связь,  $a$  – коэффициент, определяющий форму безгистерезисной кривой намагниченности,  $c$  – отношение начальных дифференциальных восприимчивостей нормальной и безгистерезисной кривой,  $k$  – константа определяющая форму гистерезиса,  $M_{sx}$  – намагниченность в насыщении,  $\vec{M}_{an}$  – безгистерезисная намагниченность.

Вычисление магнитной силы (9), притягивающей якорь к статору, производится интегрированием тензора напряжений Максвелла (10) по поверхности якоря:

$$\vec{F} = \int_{\partial\Omega} 2\pi r \vec{n} T dS, \quad (9)$$

$$\vec{n} T = -\frac{1}{2} \vec{n} (\vec{H} \vec{B}) + (\vec{n} \vec{H}) \vec{B}^t, \quad (10)$$

где  $\partial\Omega$  – граница якоря,  $T$  – тензор напряжения Максвелла,  $\vec{n}$  – вектор нормали к границе.

Параметры модели Дж-А использованы из работы [12], проводимость магнитной системы составляла  $3.15 \times 10^6$  См/м

### 3.3 Численная модель

Перейдем к моделированию изучаемого процесса. На рис. 5 изображена геометрия модели ЭМП в окружающем пространстве. Рассматриваемый ЭМП имеет ось симметрии, поэтому будем использовать осесимметричную двумерную модель. В модели необходимо присутствие так называемого бесконечного элемента, который позволяет масштабировать координаты окружающей области ЭМП на большое расстояние. На удаленной границе задается условие изоляции магнитного поля (поле имеет только касательную составляющую). Это позволяет моделировать окружающее пространство небольшого размера с меньшим числом элементов и обеспечивает корректность решения.

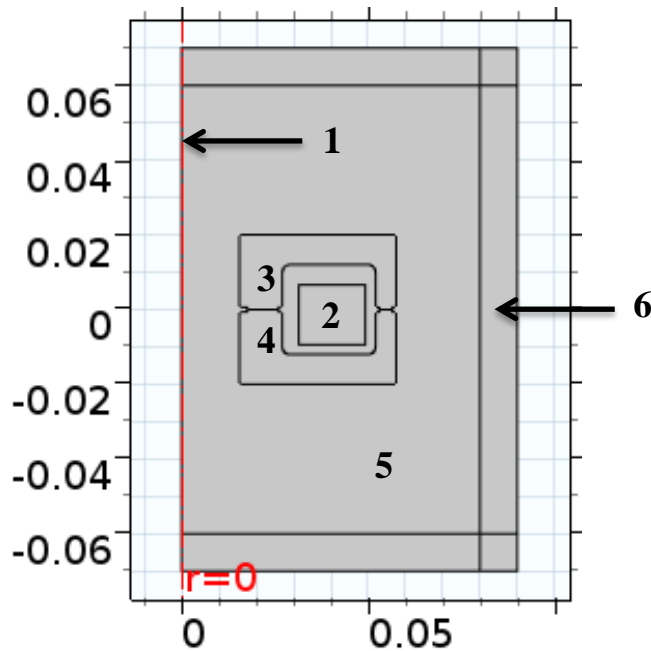


Рис. 5. Геометрия модели.

1 – ось симметрии, 2 – катушка, 3 – якорь, 4 – статор,  
5 – воздушная область, 6 – бесконечный элемент.

Для текущей постановки задачи движение обеспечивает z-я компонента ( $z$  – направлена по оси симметрии) магнитной силы. Наибольший вклад в магнитную силу имеет поверхность буртиков (поверхность соприкосновения статора и якоря, перпендикулярная оси  $z$ ). Поэтому тензор напряжений Максвелла имеет следующий вид:

$$T_{zz} = B_z H_z - \frac{BH}{2} \approx \frac{BH}{2} \quad (11)$$

Тогда магнитная сила записывается так:

$$F_z = \int_{r_0}^{r_1} 2\pi r \frac{BH}{2} dr \approx \frac{\bar{B}\bar{H}}{2} S_{\text{бур}} \quad (12)$$

где  $S_{\text{бур}}$  – площадь поверхности буртиков.

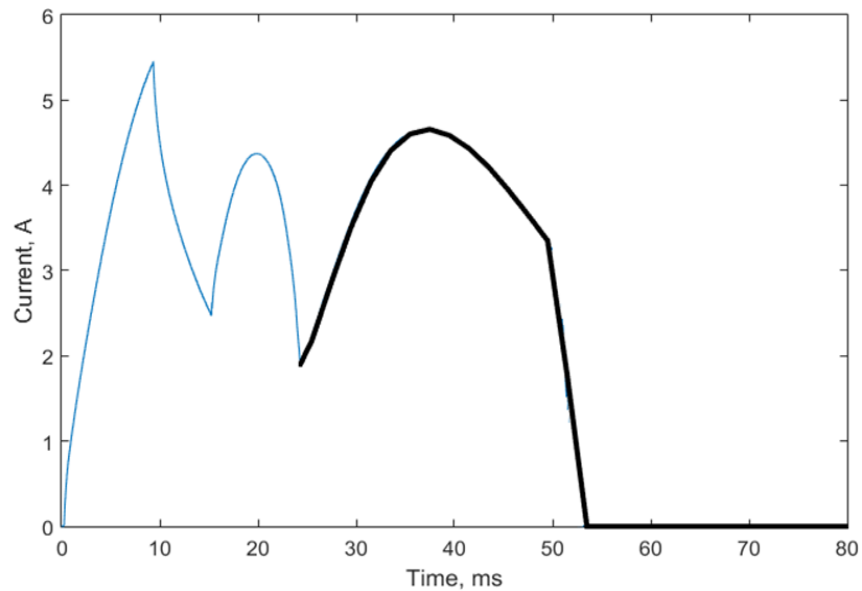
#### 4 Намагничивание ЭМП

Чтобы рассмотреть влияние внешнего магнитного поля на ЭМП в замкнутом состоянии, сначала необходимо рассмотреть процесс включения ЭМП. Это процесс был исследован в работе [12]. Эта задача достаточно ресурсоёмка для решения (используется конечно-элементная сетка изменяющаяся во времени), процесс включения описывается динамической задачей с учетом движения якоря.

Рассмотрим «упрощенный» вариант намагничивания ЭМП без учета движения якоря, подавая в катушку замкнутого ЭМП импульсный ток такой формы, чтобы остаточная «намагниченность» ЭМП соответствовала «намагниченности» в случае моделирования задачи динамики включения [12].

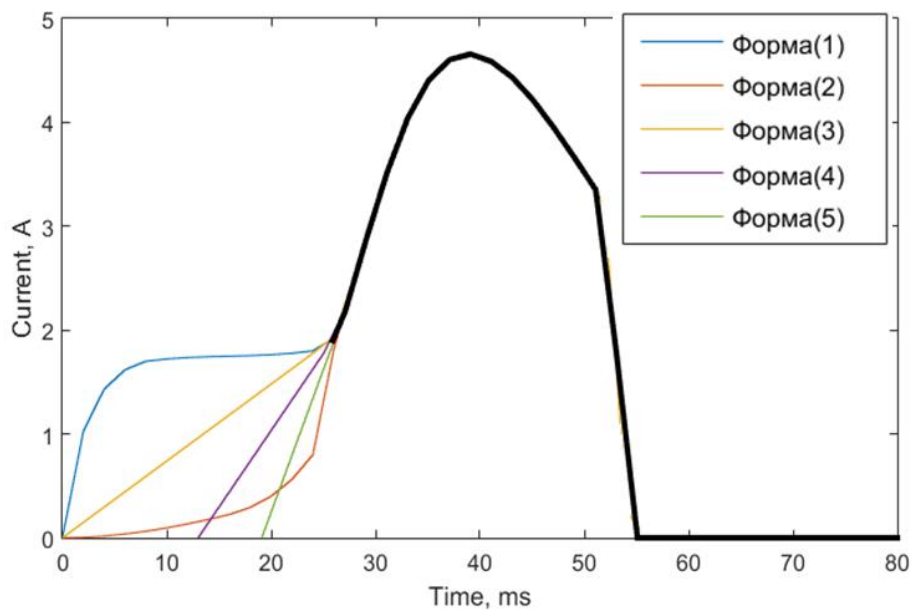
Как уже было сказано, в процессе включения якорь ЭМП притягивается к статору, в катушке ЭМП протекает электрический ток, временная зависимость которого изображена на рис. 6. Блок управления (БУ) использует двухимпульсную схему включения. При первом импульсе (до 9 мс) с ростом тока в ЭМП нарастает магнитный поток, который увеличивает силу притяжения якоря к статору. В момент, когда магнитная сила по величине сравняется с противодействующими силами (усилие пружины отключения, сила тяжести, усилие от ВДК), якорь начинает движение. С момента 9 мс до 15 мс батарея конденсаторов отключается от катушки ЭМП, и катушка замыкается на себя через диод (на рис. 6 соответствует спаду тока). В момент 15 мс батарея конденсаторов снова подключается к катушке ЭМП. Движение продолжается до «соприкосновения» (конечный зазор составляет 10мкм) со статором в момент времени  $t=24$  мс. Процесс намагничивания ЭМП в замкнутом состоянии называется домагничиванием и обеспечивает постановку ЭМП на магнитную защелку. После осуществления процесса включения ток в катушке «отключается» БУ.

Для «упрощенной» механостатической задачи (для замкнутого ЭМП и неподвижного якоря) рассмотрим намагничивание ЭМП током домагничивания (черный участок на рис. 6).



*Рис. 6. Ток в катушке ЭМП динамической задачи.*

На рис. 7 обозначены рассматриваемые варианты тока намагничивания ЭМП для механостатической задачи. Отличительной особенностью этих вариантов является начальный участок тока (форма(1)-форма(5)), после которого уже протекает ток домагничивания. Эти варианты сравниваются с целью определения влияния предыстории на намагниченность ЭМП.



*Рис. 7. Варианты зависимости тока в катушке ЭМП от времени для статической задачи.*

На рис. 8 изображен еще один рассмотренный вариант тока намагничивания, имеющий гауссову форму и характеризующийся такой же амплитудой тока, но при этом его длительность во времени заметно превышает предыдущие варианты.

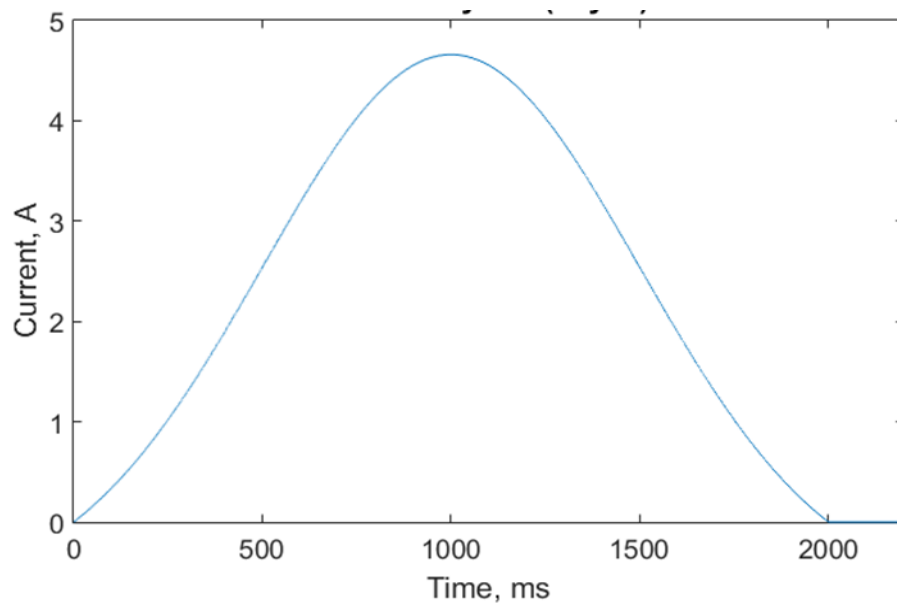
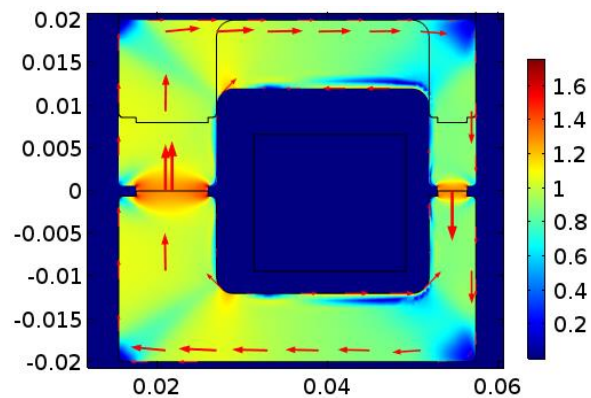


Рис. 8. Гауссова зависимость тока в катушке ЭМП для статической задачи.

После решения набора задач с различной формой тока в катушке (рис. 7-8) сравним результаты решения с задачей динамики [12]. Интерес представляет остаточная «намагниченность» ЭМП. На Рис. 9 представлены контурные графики распределения модуля магнитной индукции в ЭМП для задачи динамики, задачи механостатики с током представленным на рис.7 (Форма(5)) и задачи механостатики с током представленным на рис.8. На распределениях видны количественные отличия.



a)

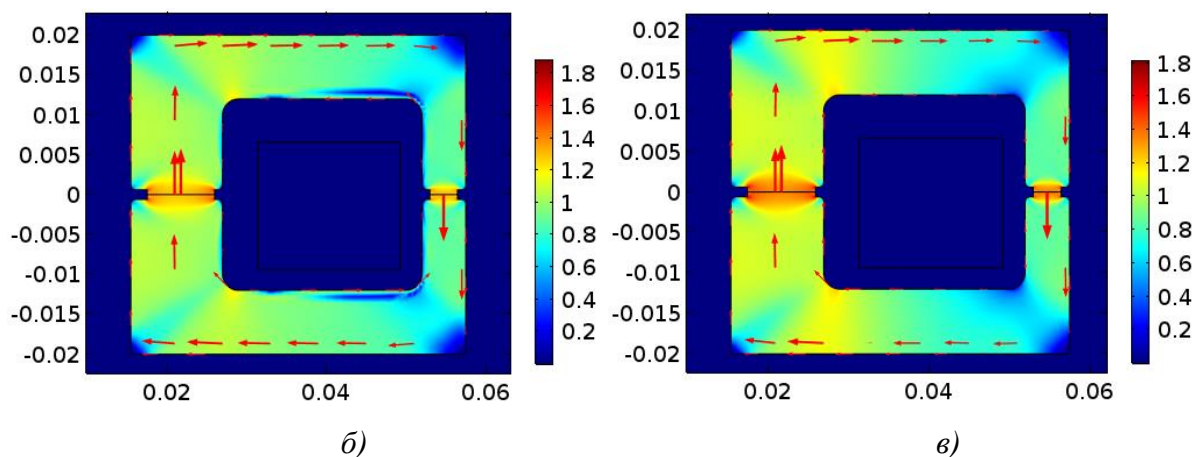


Рис. 9. Контурные графики распределения магнитной индукции (Тл): а). динамическая задача, б). вариант тока Форма(5), в). гауссова зависимость тока от времени.

Результаты решений нагляднее будет сравнить по распределению магнитной индукции вдоль наиболее характерных линий (рис. 10), как локальной характеристики, и по значению магнитной силы установившейся после процесса намагничивания, как интегральной характеристики. Все варианты (рис. 7) показали одинаковое распределение магнитной индукции в конечный момент времени, поэтому далее будем сравнивать с динамической задачей только вариант Форма(5) из-за его наименьшей длительности и вариант на рис. 8.

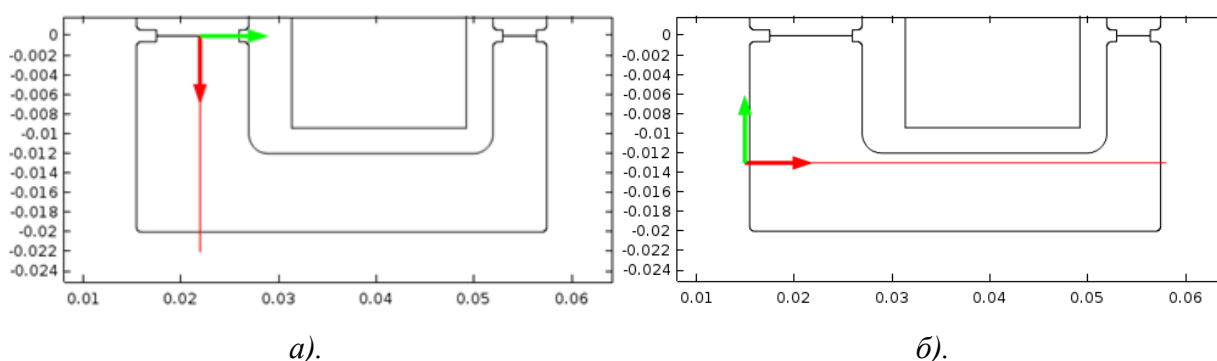
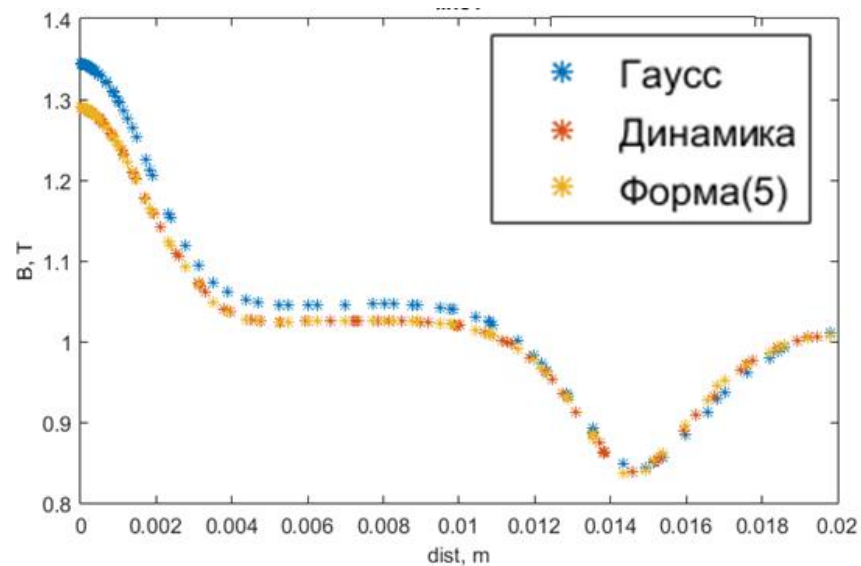


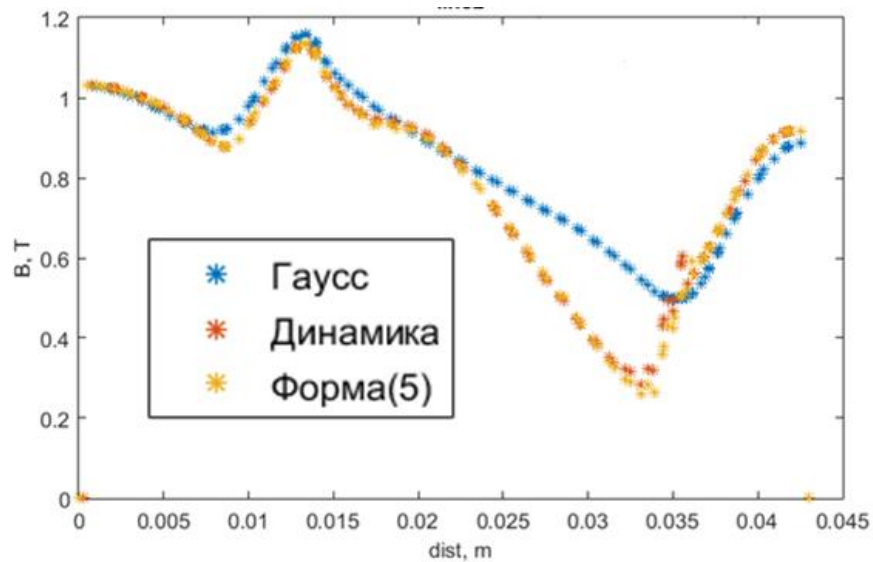
Рис. 10. Характерные линии на статоре, вдоль которых строятся распределения магнитной индукции: а). линия1, б). линия2.

На рис. 11 представлены распределения магнитной индукции вдоль линий (рис. 10). Прослеживается хорошее совпадение варианта Форма(5) с задачей динамики, а вариант с током, представленным на рис. 8, имеет существенные отличия. Что связано с разницей в длительности импульса тока.





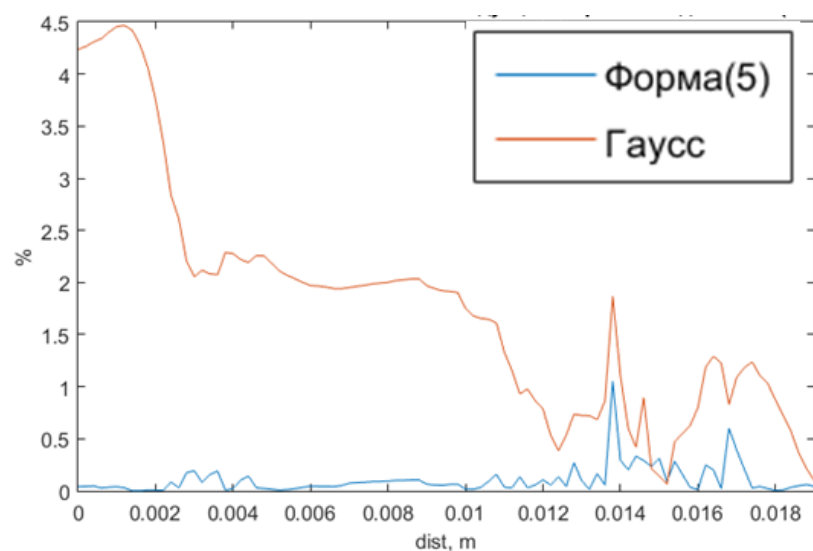
а)



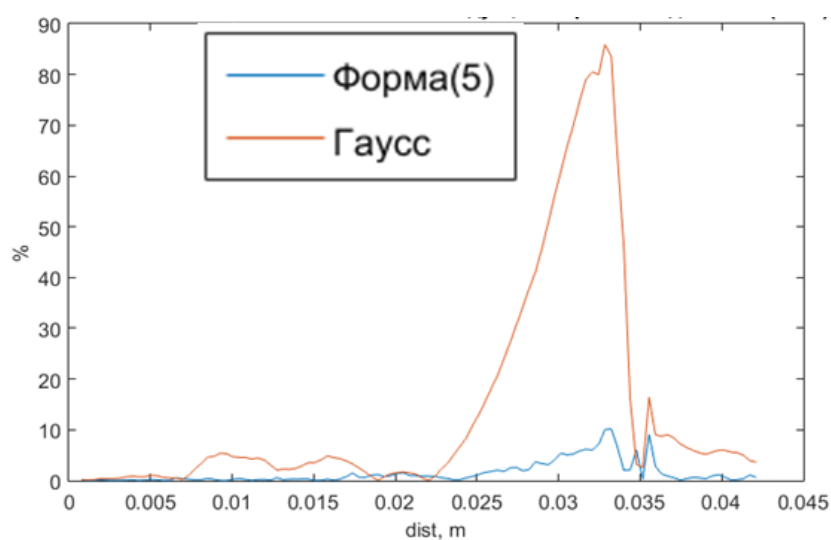
б)

Рис. 11. Распределение магнитной индукции вдоль линии 1 а) и вдоль линии 2 б).

Рассмотрим относительное отклонение распределений магнитной индукции представленных вариантов (рис. 12). На рис. 12а максимальная ошибка распределения магнитной индукции вдоль линии на рис. 10а для «Формы(5)» достигает 1%, для «гауссовой» зависимости не превышает 5%, что является хорошим показателем совпадения с задачей динамики. Но существенное отличие заметно по графику на рис. 12б. Для «Формы(5)» погрешность лежит в пределах 10%, в то время как для «гауссовой» зависимости она достигает 85%, что явно указывает на несоответствие задачи с «гауссовой» зависимостью тока результатам динамической задачи.



а)



б)

Рис. 12. Относительная погрешность магнитной индукции вдоль линии1 а) и вдоль линии2 б).

Теперь сравним решения задач по магнитной силе, в Таблице 1 представлены рассчитанные значения магнитной силы для каждой задачи. Магнитная сила при вариантах тока Форма(1)-(5) хорошо совпадает с магнитной силой динамической задачи. При использовании «гауссовой» формы тока величина магнитной силы имеет существенное отличие.

Таблица 1. Значение магнитной силы в зависимости от формы намагничивающего тока в катушке.

Ток	Динамика	Форма(1)	Форма(2)	Форма(3)	Форма(4)	Форма(5)	Гаусс
Сила, *10 <sup>3</sup> Н	1.61	1.61	1.62	1.62	1.61	1.62	1.74

Явное отличие решения задачи с вариантом тока (рис. 8) от других вариантов (рис. 7) связано с достаточно большой длительностью импульса тока (2 секунды). Это в свою очередь повлияло на поведение индуцированных токов в якоре и статоре. На рис. 13а показана средняя плотность индуцированных токов в статоре для «гауссова» тока и для тока «Формы(5)» на рис. 13б. Скачок индуцированного тока в первом случае значительно меньше чем во втором из-за медленного изменения величины индукции магнитного поля, создаваемого катушкой в ЭМП.

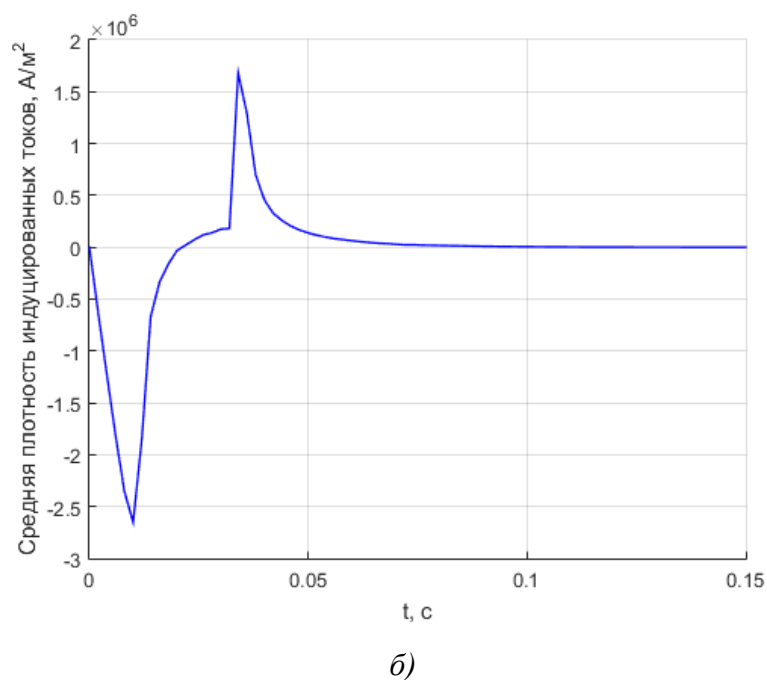
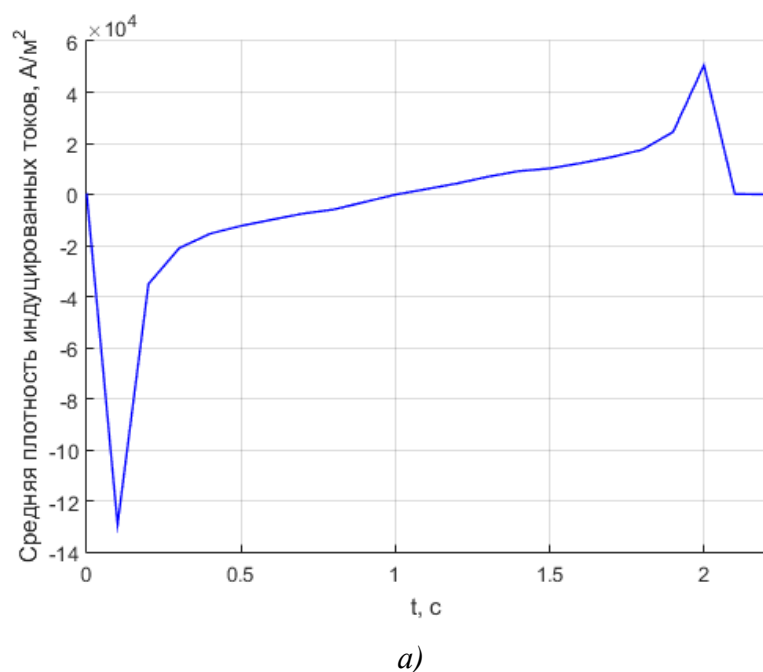


Рис. 13. Средняя плотность индуцированных токов в статоре а) для гауссовой зависимости тока и б) для зависимости тока Формы(5).

В соответствии с представленными расчетами можно сделать вывод, распределение остаточной «намагниченности» ЭМП в задаче динамики совпадает с распределением остаточной «намагниченности» в задаче механостатики наиболее точно при использовании тока, изображенного на рис. 7. Для последующего моделирования намагничивания ЭМП выбран ток «Формы(5)» на рис. 7, имеющий самую короткую длительность.

В результате расчетов показано, что динамическую задачу можно заменить на механостатическую без значительной потери точности.

## 5 Влияние внешнего магнитного поля на ЭМП

### 5.1 Влияние внешнего стационарного магнитного поля на ЭМП

Перейдем ко второму шагу решения задачи, а именно, к воздействию внешним полем на предварительно намагниченный ЭМП. Рассмотрим влияние на состояние ЭМП внешнего однородного стационарного магнитного поля величиной 80 мТл (рис. 14), направленного по оси симметрии ЭМП. Существует два возможных варианта: поле направленное вверх и поле направленное вниз (рис. 15).

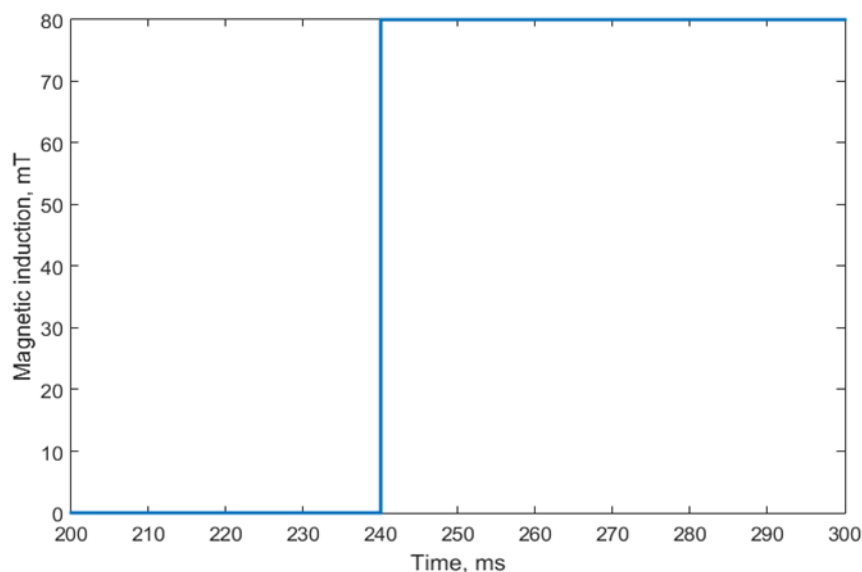


Рис. 14. Зависимость величины внешнего магнитного поля от времени.

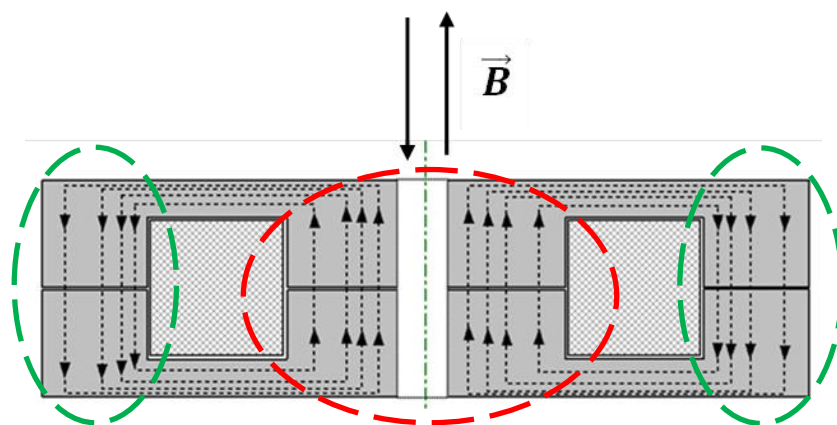


Рис. 15. Направления магнитного поля в статоре и якоре, и внешнего магнитного поля.  
Красным цветом обозначена внутренняя часть ЭМП, зеленым – внешняя часть.

Внешнее магнитное поле подается не сразу после намагничивания ЭМП электрическим током в катушке. Импульс магнитного поля включается в момент времени 240 мс, когда индуцированные токи, возникшие вследствие процесса намагничивания, затухли.

Для исследования влияния амплитуды внешнего магнитного поля на ЭМП была решена серия задач с амплитудами 10 мТл, 30 мТл, 50 мТл, 80 мТл (диапазон изменения поля выбран, исходя из характерных значений индукции магнитного поля от аварийных токов) в обоих направлениях (вниз и вверх). Рассмотрим распределение модуля магнитной индукции в ЭМП на рис. 16. Когда внешнее поле направлено вверх, оно сонаправлено с магнитным полем во внутренней части ЭМП и противоположно направлено с магнитным полем во внешней части ЭМП. Соответственно внутренняя часть ЭМП намагничивается, а внешняя размагничивается. Противоположная ситуация происходит с внешним магнитным полем, направленным вниз: намагничивается внешняя часть (где внутреннее и внешнее поля сонаправлены) и размагничивается внутренняя часть. При этом направление магнитного потока в магнитной системе стремится сориентироваться в направлении внешнего магнитного поля (в верхней и нижней части ЭМП). Также заметно, как с увеличением амплитуды внешнего поля меняется «намагниченность» магнитной системы, приобретая более выраженный характер по направлению внешнего магнитного поля.

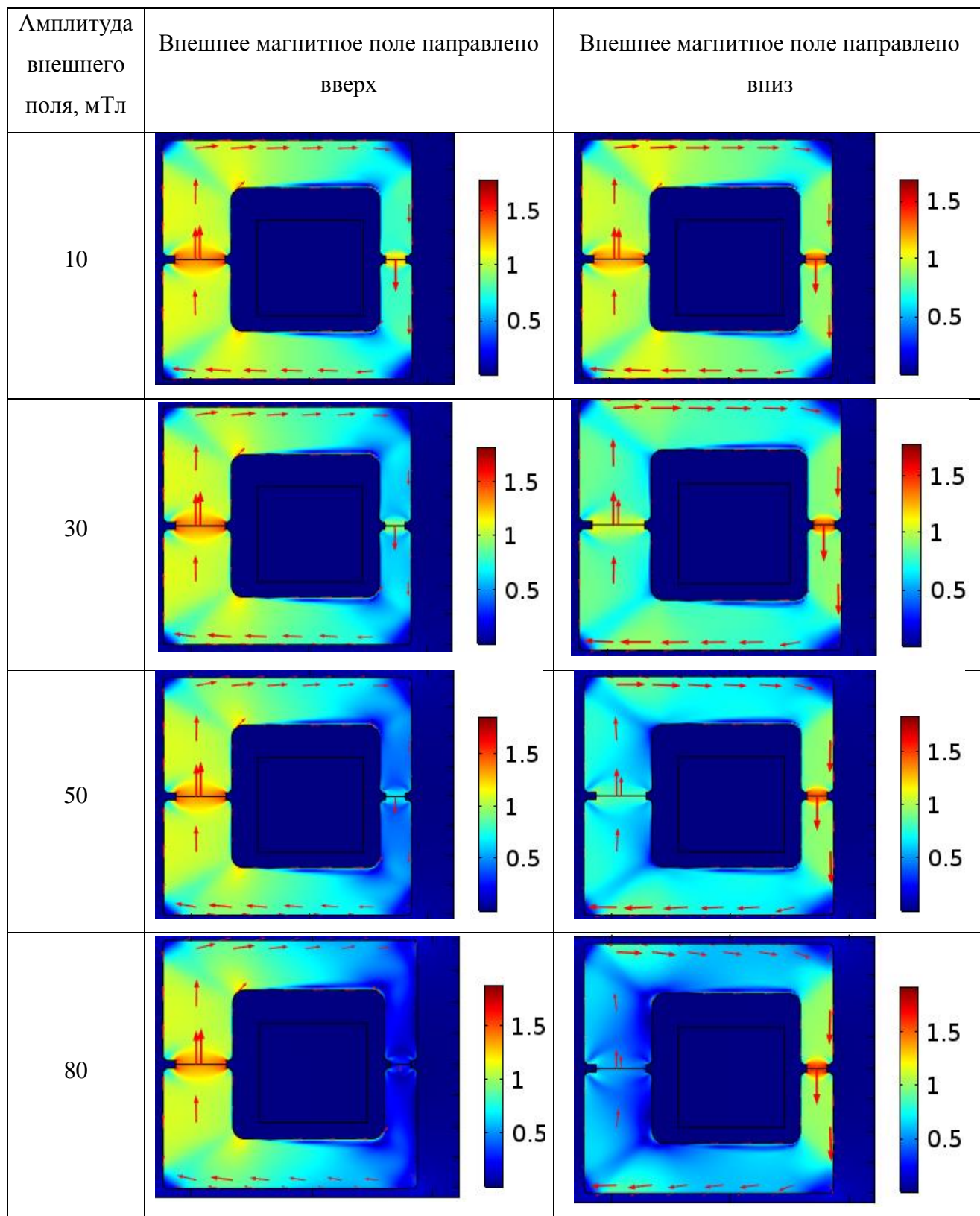


Рис. 16. Контурные графики распределения модуля магнитной индукции (Тл), магнитное поле направлено вверх – слева, вниз – справа.

На рис. 17 представлена зависимость магнитной силы от величины внешнего магнитного поля. В обоих направлениях действия внешнее магнитное поле уменьшает

магнитную силу. Видно, что для поля, направленного вниз, магнитная сила изменяется меньше, чем при противоположно направленном поле.

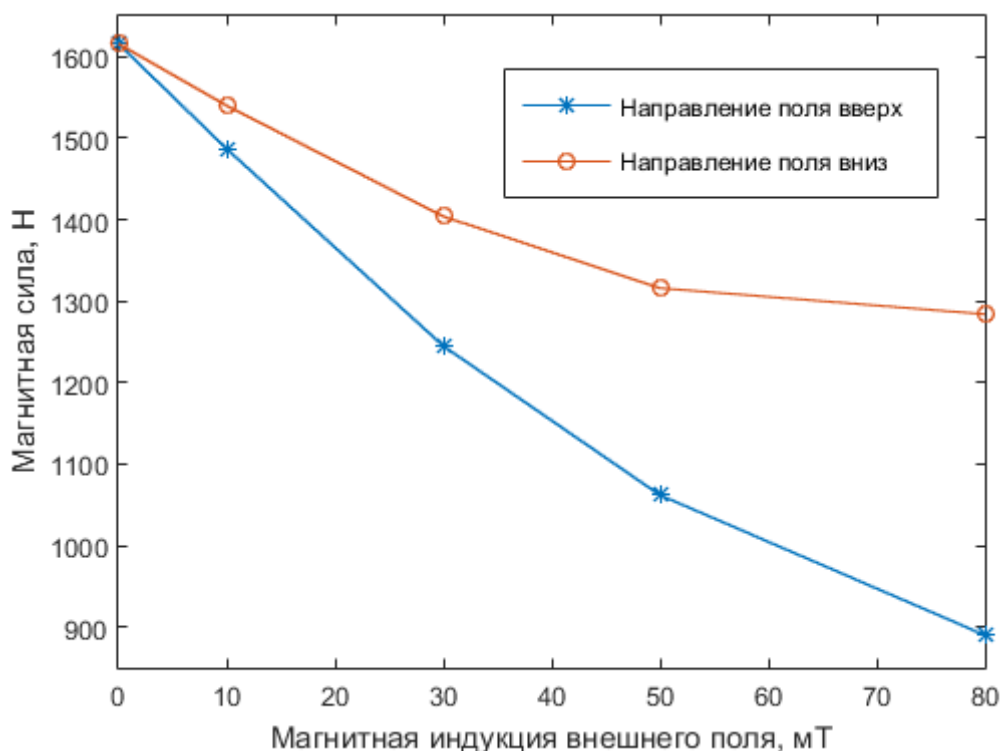


Рис. 17. Зависимость магнитной силы от амплитуды внешнего МП.

Рассмотрим распределение плотности магнитной силы на поверхности буртиков ЭМП рис. 19 (на рис. 18 также представлена линия, вдоль которой построено распределение). Соответственно, когда внешнее магнитное поле сонаправлено с полем во внешней части ЭМП, т. е. направлено вниз, магнитная сила увеличивается во внешней части значительней, чем в противоположном случае (при внешнем магнитном поле, направленном вверх, магнитная сила во внутренней части увеличивается меньше).

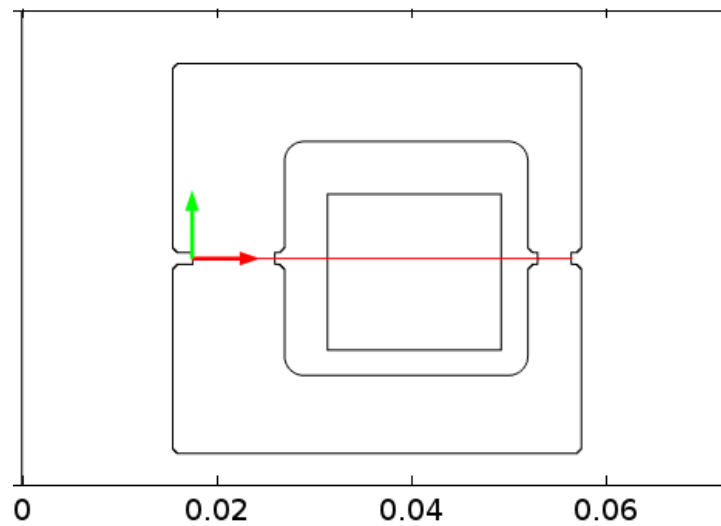


Рис. 18. Линия, проходящая посередине воздушного зазора.

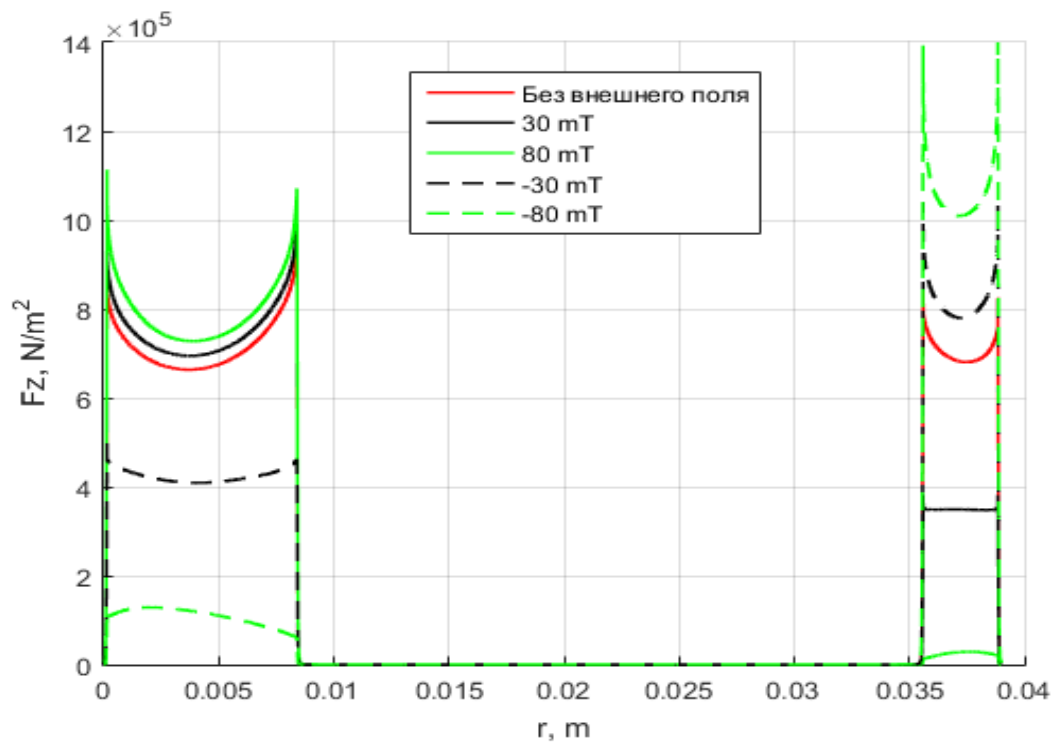


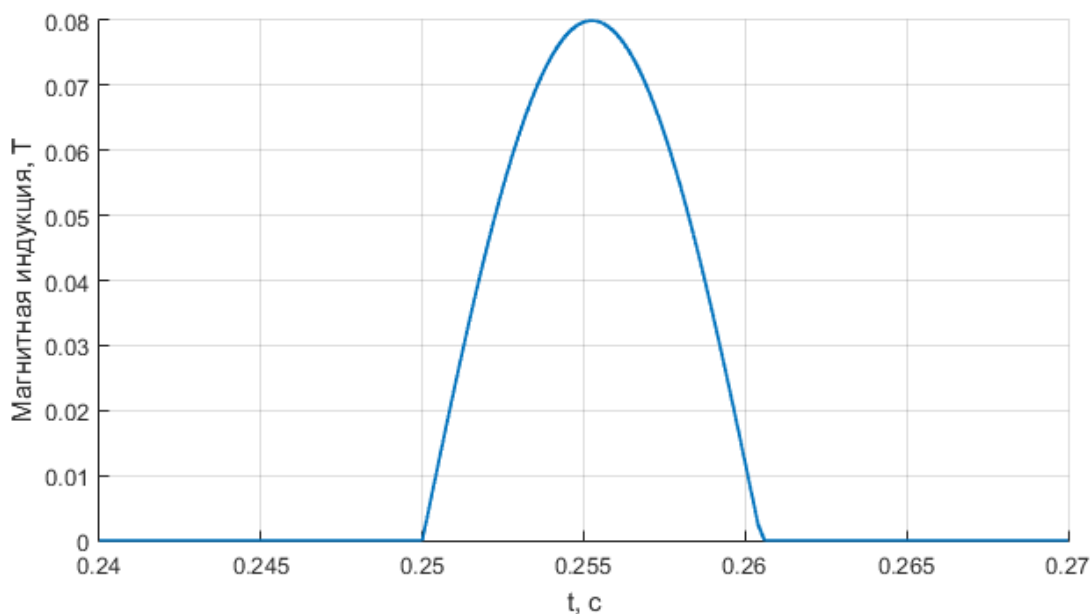
Рис. 19. Распределение поверхностной плотности магнитной силы вдоль линии на рис. 18.

## 5.2 Влияние внешнего импульсного магнитного поля на ЭМП

### 5.2.1 Влияние внешнего импульсного магнитного поля на ЭМП с разомкнутой катушкой

Перейдем к рассмотрению влияния внешнего нестационарного магнитного поля. Будем воздействовать на ЭМП импульсом полуволны синуса длительностью 10,6 мс (рис. 20) амплитуды 80 мТл. Величина полупериода продиктована характерным временем воздействия на ЭМП внешним магнитным полем в экспериментальных исследованиях. Рассмотрим случай с разомкнутой катушкой.





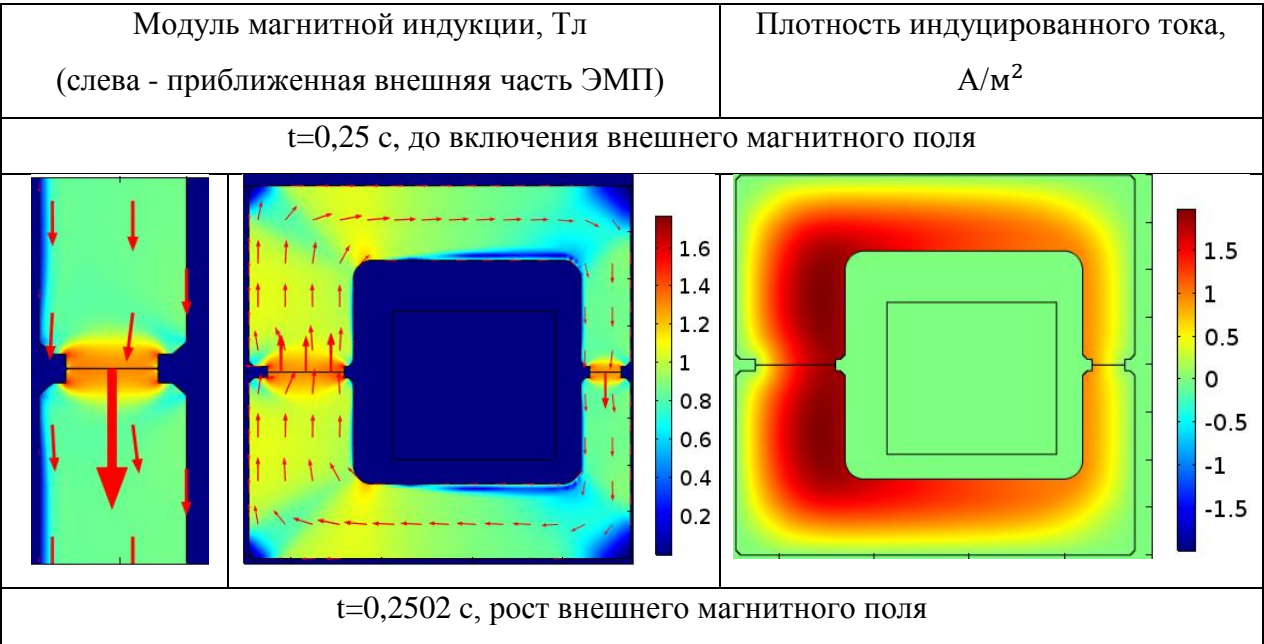
*Рис. 20 Импульс внешнего магнитного поля.*

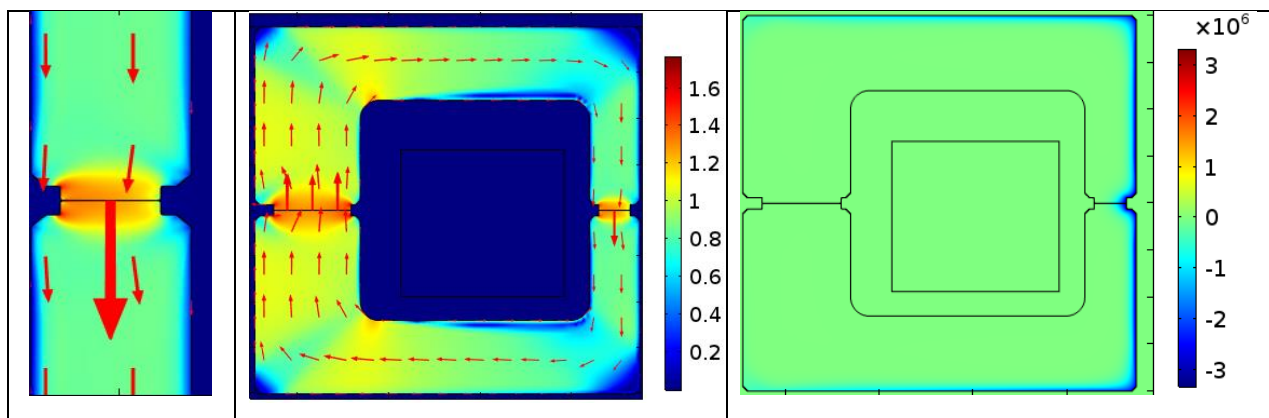
Анализировать процессы, происходящие в ЭМП удобно по распределению в нем магнитной индукции и индуцированных токов. На рис. 21 представлены контурные графики распределений модуля магнитной индукции и плотности индуцированного тока при внешнем магнитном поле, направленном вверх, в разные моменты времени. Положительная величина индуцированного тока направлена в плоскость рисунка, отрицательная – из плоскости. Также на рис. 21 представлено увеличенное изображение распределения магнитной индукции во внешнем кольце ЭМП, т. к. внешнее магнитное поле оказывало влияние именно на эту часть. Внешнее магнитное поле в первую очередь начинает действовать на внешнее кольцо ЭМП, существенно изменяя его намагниченность. А во внутреннюю часть ЭМП магнитное поле не успевает полностью проникнуть из-за короткого по длительности импульса внешнего магнитного поля. Поэтому изменения магнитной индукции во внутреннем кольце существенно меньше, чем во внешнем кольце.

Рассмотрим рис. 21, в момент включения внешнего магнитного поля ( $t=0,25$  с) ЭМП имеет остаточную намагниченность (после процесса включения), индуцированные токи при этом затухли (малая величина, близкая к нулю). С ростом амплитуды внешнего магнитного поля в промежутке времени  $[0,2502; 0,2552]$  с на внешней поверхности ЭМП возникает и проникает вглубь статора и якоря первая волна индуцированных токов. Эта волна направлена из плоскости рисунка, и величина токов отрицательная. Индуцированные токи создают магнитное поле, направленное вниз и уменьшающее внешнее магнитное поле. При этом внешнее кольцо ЭМП размагничивается под действием внешнего поля, т.к. поле во внешнем кольце противоположно направлено внешнему полю. А поток магнитного поля на внешней поверхности меняет свою ориентацию по направлению внешнего магнитного поля

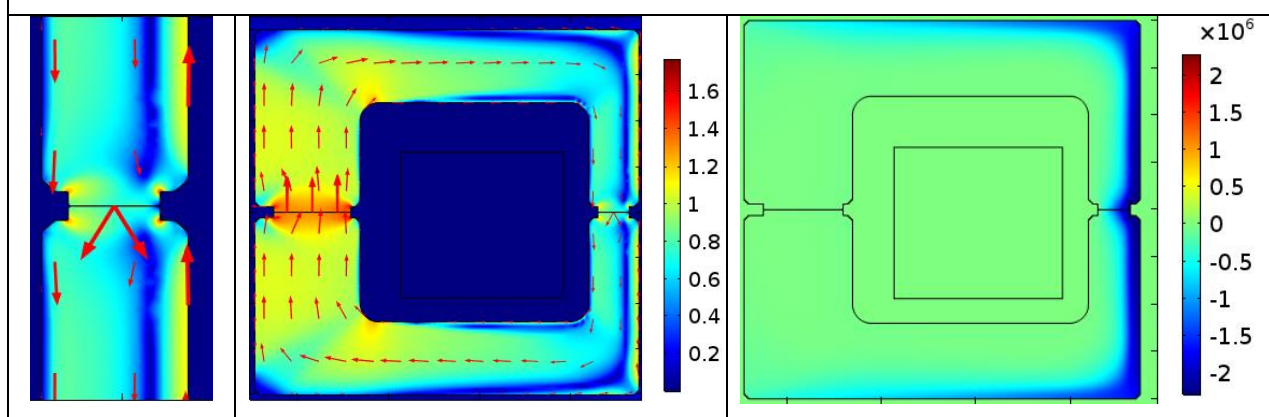
( $t=0,253$  с). В этот момент среднее значение индуцированного тока достигает своего максимального значения и начинает затухать.

Затем амплитуда внешнего поля начинает уменьшаться в промежутке времени  $[0,2552; 0,2606]$  с, и на внешней поверхности ЭМП возникает вторая волна индуцированных токов. Вторая волна направлена противоположно первой волне, и имеет положительное значение. Соответственно, индуцированные токи образуют магнитное поле, направленное вверх. С течением времени вторая волна распространяется в объем статора и якоря и растет по величине, при этом первая волна постепенно затухает. Т. е. в промежутке времени  $(0,2552; 0,257)$  с одновременно в ЭМП существуют противоположно направленные индуцированные токи. При этом отрицательные индуцированные токи уменьшаются по величине вместе с внешним полем, а положительные увеличиваются. В момент времени  $t=0,257$  с первая волна отрицательных индуцированных токов полностью затухла, и амплитуда внешнего магнитного поля приближается к нулю. А вторая волна индуцированного тока продолжает проникать внутрь ЭМП. Магнитное поле на внешней поверхности ЭМП поворачивается в свое первоначальное направление, т.е. вниз ( $t=0,2604$  с). В этот момент времени среднее значение второй волны индуцированного тока достигает своего максимального значения по величине и начинает затухать. Т. о. внешнее кольцо ЭМП намагничивается. При отсутствии внешнего магнитного поля  $((0,2606; 0,35)$  с) вторая волна положительных индуцированных токов продолжает распространяться во внутреннюю часть ЭМП. Индуцированные токи затухают, и значение магнитной индукции в ЭМП уменьшается.

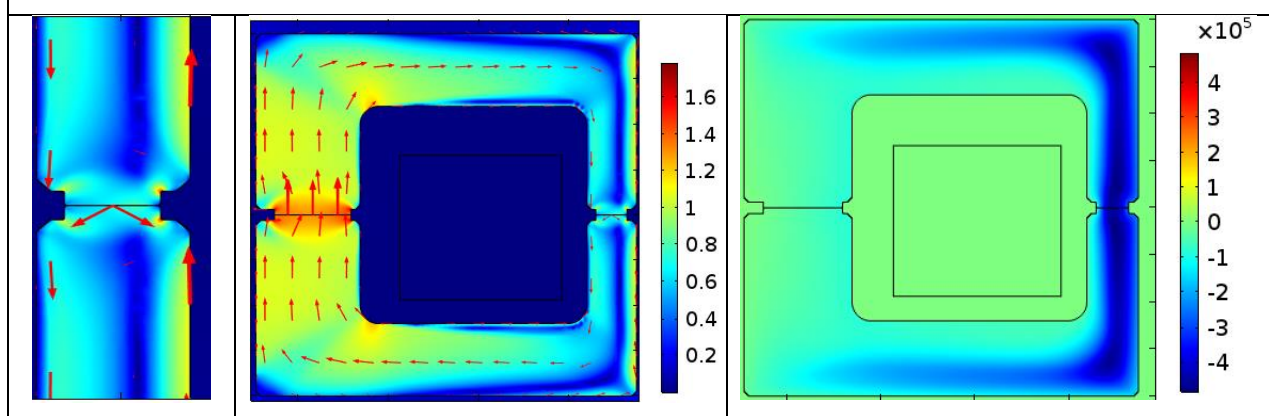




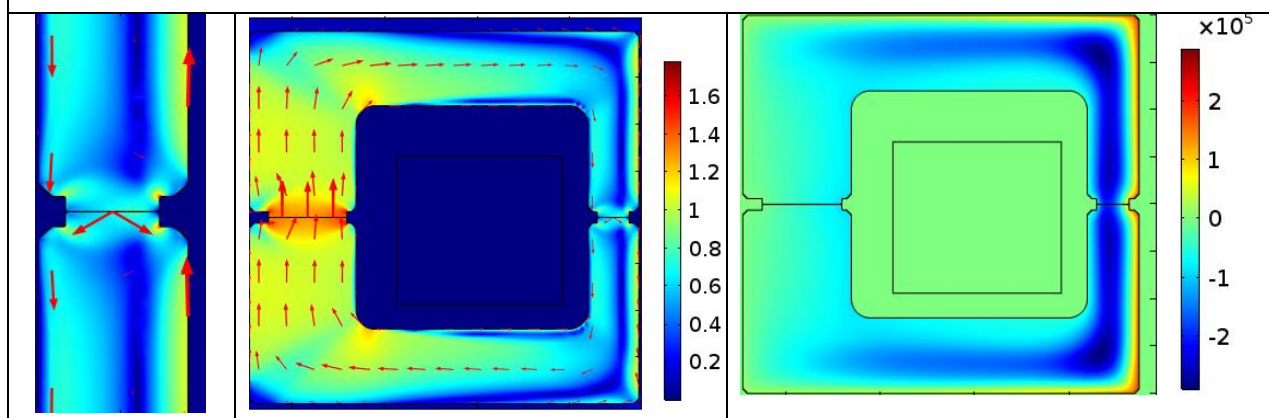
$t=0,253$  с, рост внешнего магнитного поля



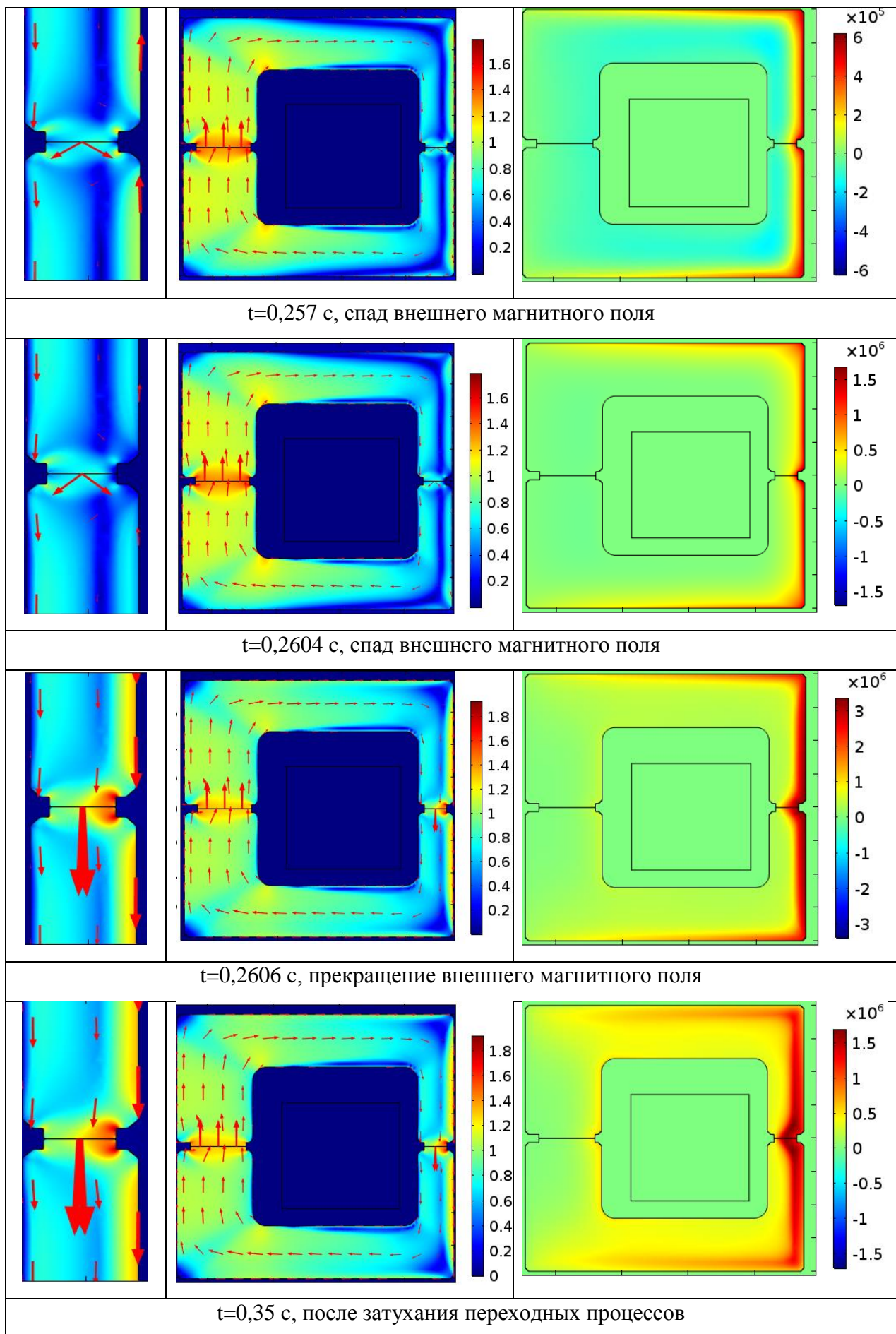
$t=0,2552$  с, пик внешнего магнитного поля



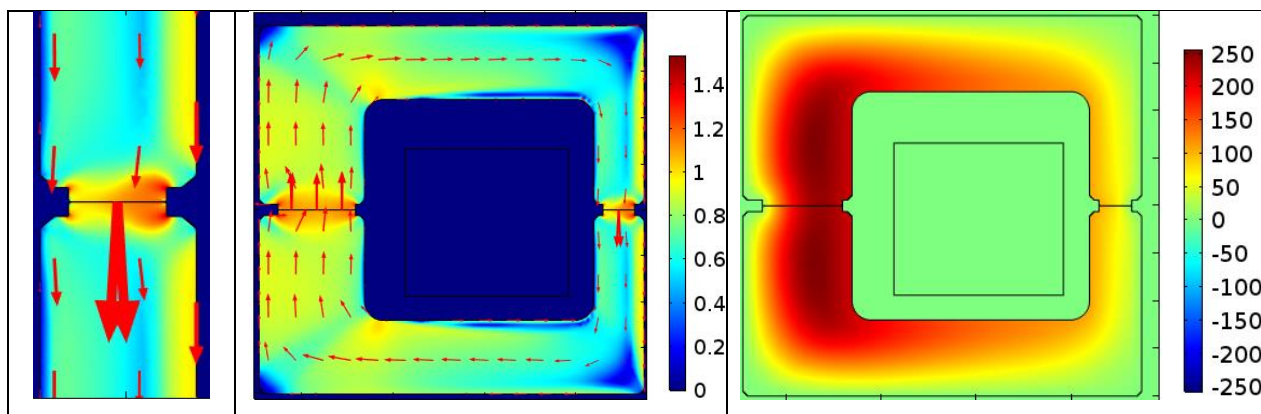
$t=0,2556$  с, спад внешнего магнитного поля



$t=0,256$  с, спад внешнего магнитного поля





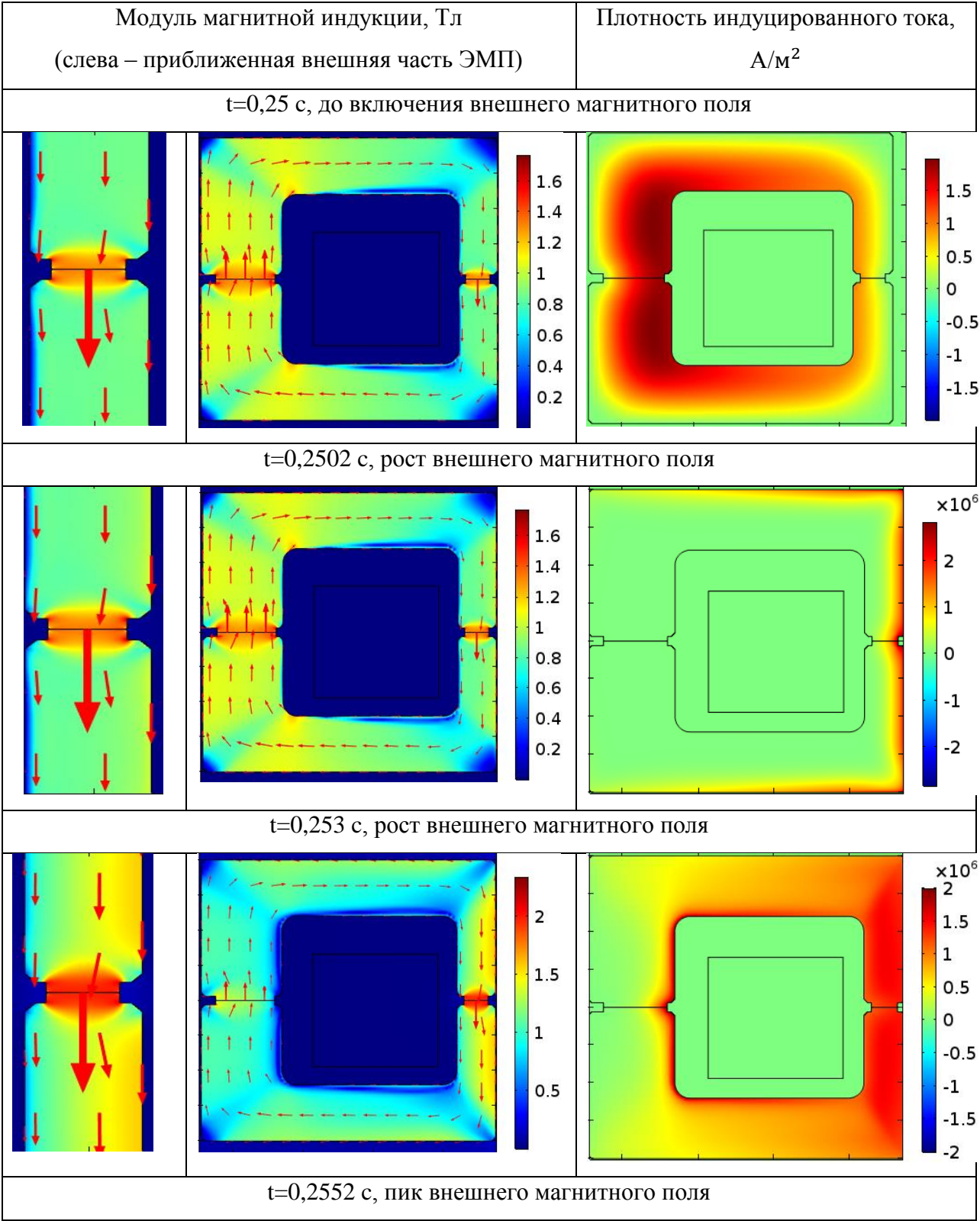


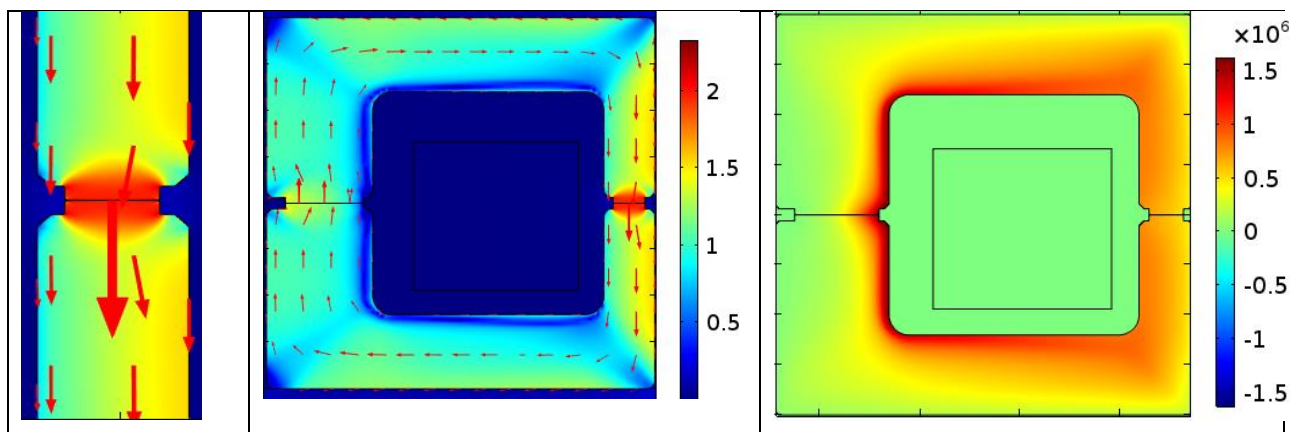
*Рис. 31. Поверхностные распределения модуля магнитной индукции и плотности индуцированного тока в разные моменты времени. Внешнее магнитное поле направлено вверх.*

При внешнем магнитном поле, направленном вниз, по аналогии с предыдущим случаем на рис. 22 при включении внешнего поля ( $t=0,2502$  с) на внешней поверхности возникают индуцированные токи (но уже в другом направлении) положительной величины, направленные в плоскость рисунка. Эта первая волна индуцированных токов вызвана ростом амплитуды внешнего магнитного поля. Индуцированные токи формируют магнитное поле, направленное вверх. Первая волна со временем проникает на внутреннюю поверхность ЭМП. Направление магнитного потока на этой поверхности меняется на противоположное (вдоль направления внешнего поля - вниз), в этот момент времени ( $t=0,253$  с) значение средней плотности индуцированного тока достигло максимума и начинает снижаться. В это же время внешнее поле сонаправлено с полем во внешнем кольце, поэтому магнитная индукция в нем возрастает. Так же намагничивается внешняя поверхность ЭМП. За счет этих процессов значение магнитной индукции в ЭМП увеличилось.

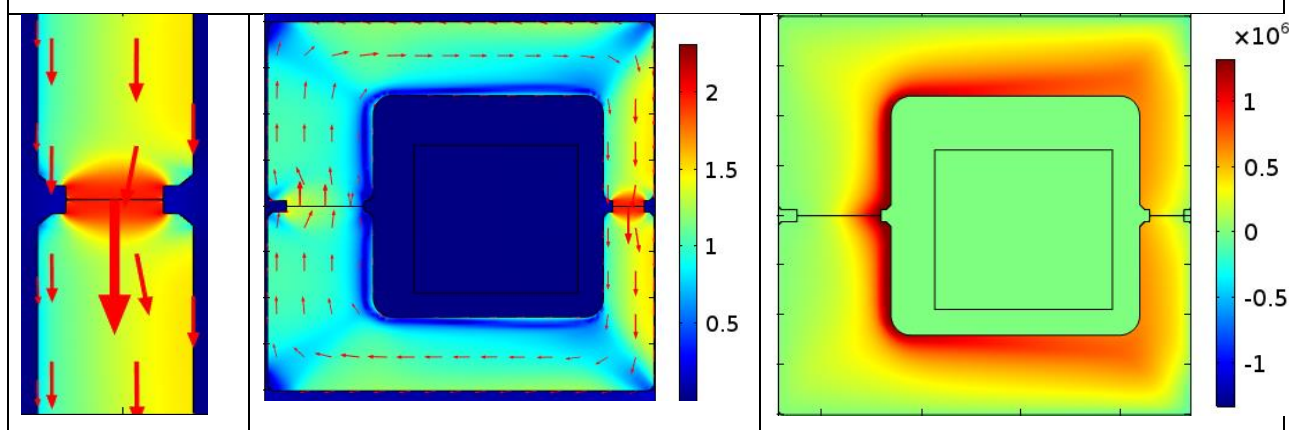
С уменьшением амплитуды внешнего магнитного поля ( $t=0,2552$  с) возникает вторая волна противоположно направленных отрицательных индуцированных токов. Вторая волна формирует магнитное поле, направленное вниз. Индуцированные токи этой волны проникают в объем статора и якоря и растут по величине. Первая волна затухает дольше в сравнении со случаем внешнего магнитного поля, направленного вверх. Т. е. промежуток времени сосуществования в ЭМП противоположно направленных индуцированных токов заметно больше ( $(0,2552; 0,262)$  с). Лишь в момент времени  $t=0,262$  с первая волна отрицательных индуцированных токов полностью затухла, когда внешнее поле давно отсутствует (с момента  $t=0,2606$ ). В момент максимального значения средней плотности индуцированного тока ( $t=0,2604$  с) магнитное поле на внешней поверхности ЭМП разворачивается вверх. Далее индуцированный ток начинает затухать, вклад в этот процесс вносят и первая, и вторая волна. Внешнее кольцо ЭМП размагничивается, магнитная

индукция в нем уменьшается. При этом индуцированные токи второй волны продолжают проникать в ЭМП и уменьшаются по величине.

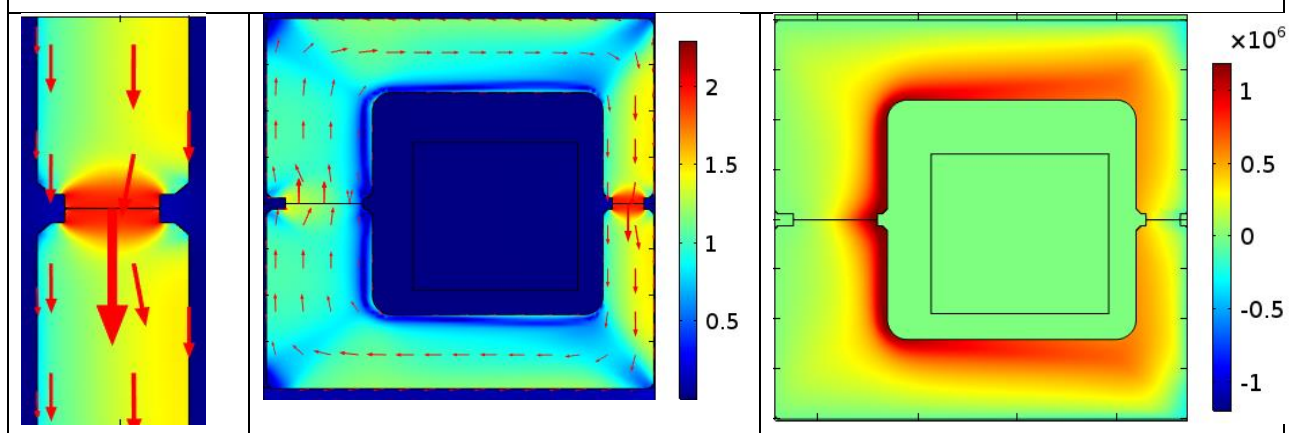




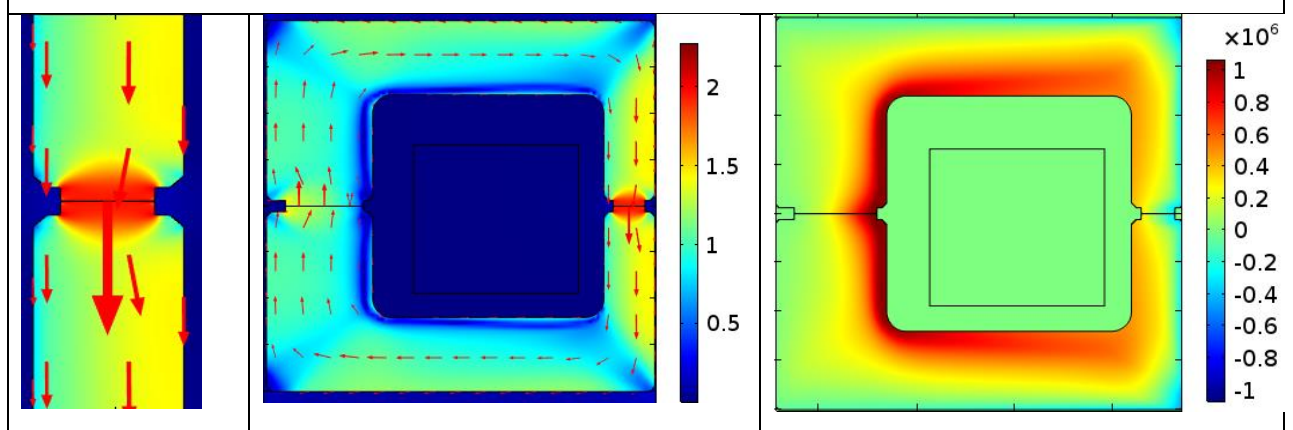
$t=0,2556$  с, спад внешнего магнитного поля



$t=0,2558$  с, спад внешнего магнитного поля

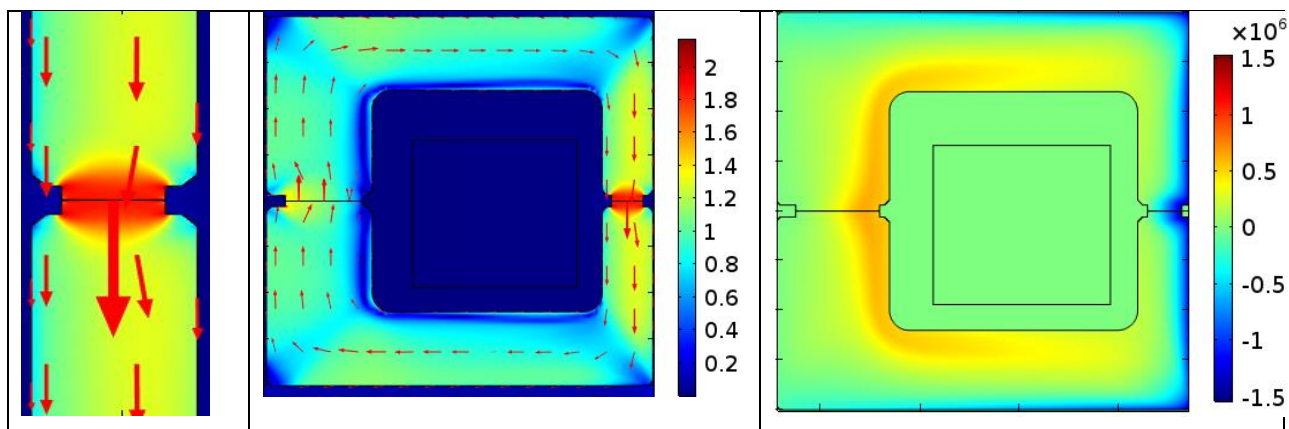


$t=0,256$  с, спад внешнего магнитного поля

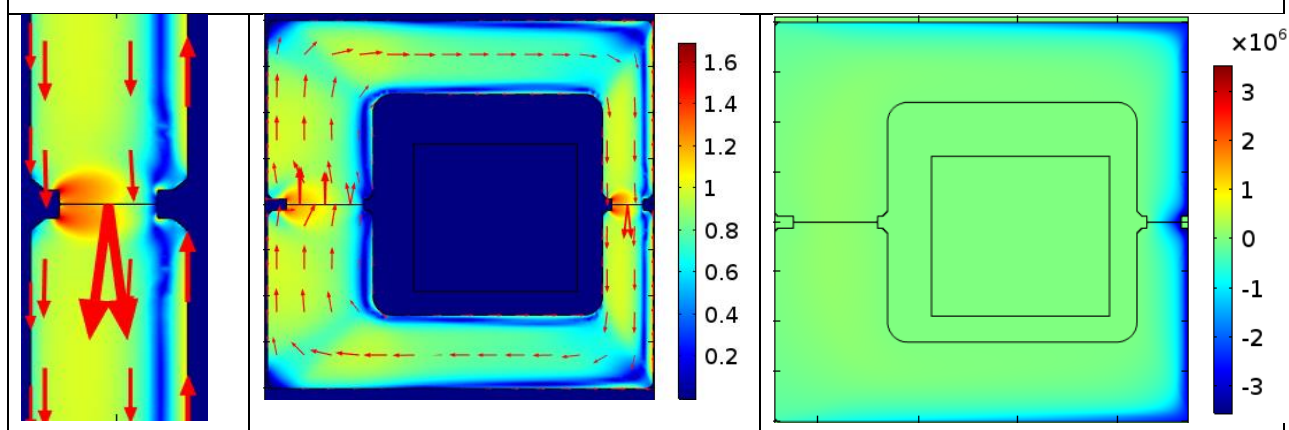


$t=0,257$  с, спад внешнего магнитного поля

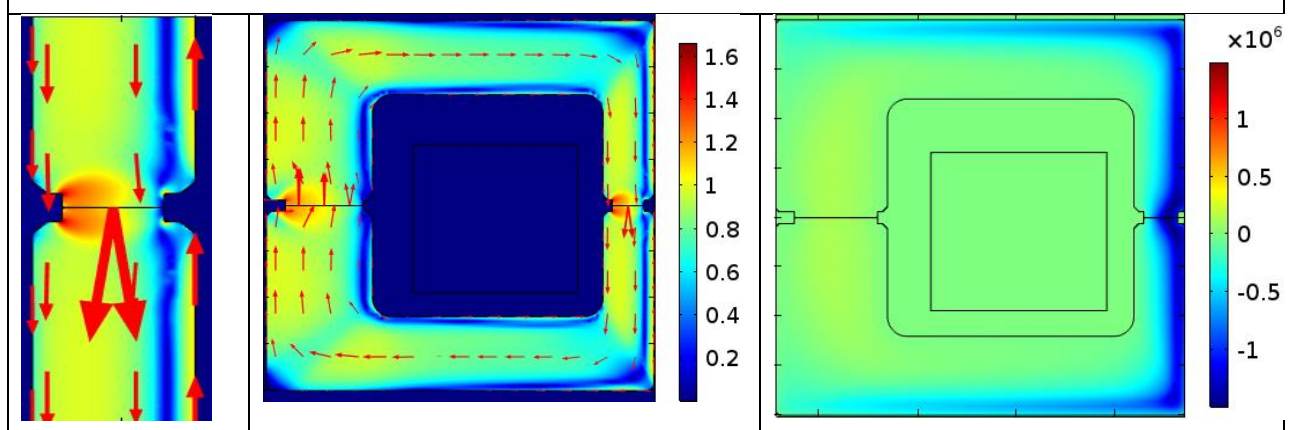




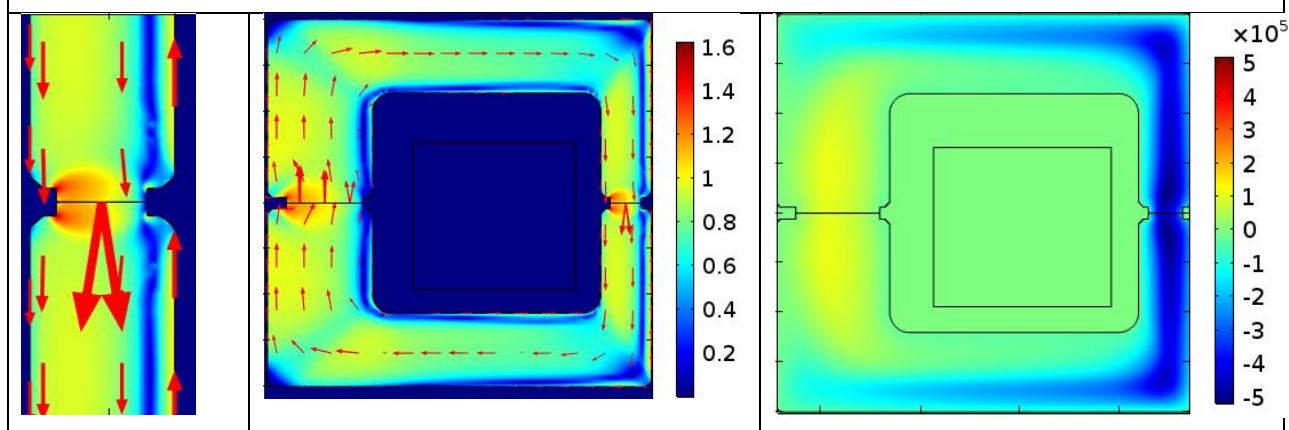
$t=0,2604$  с, спад внешнего магнитного поля



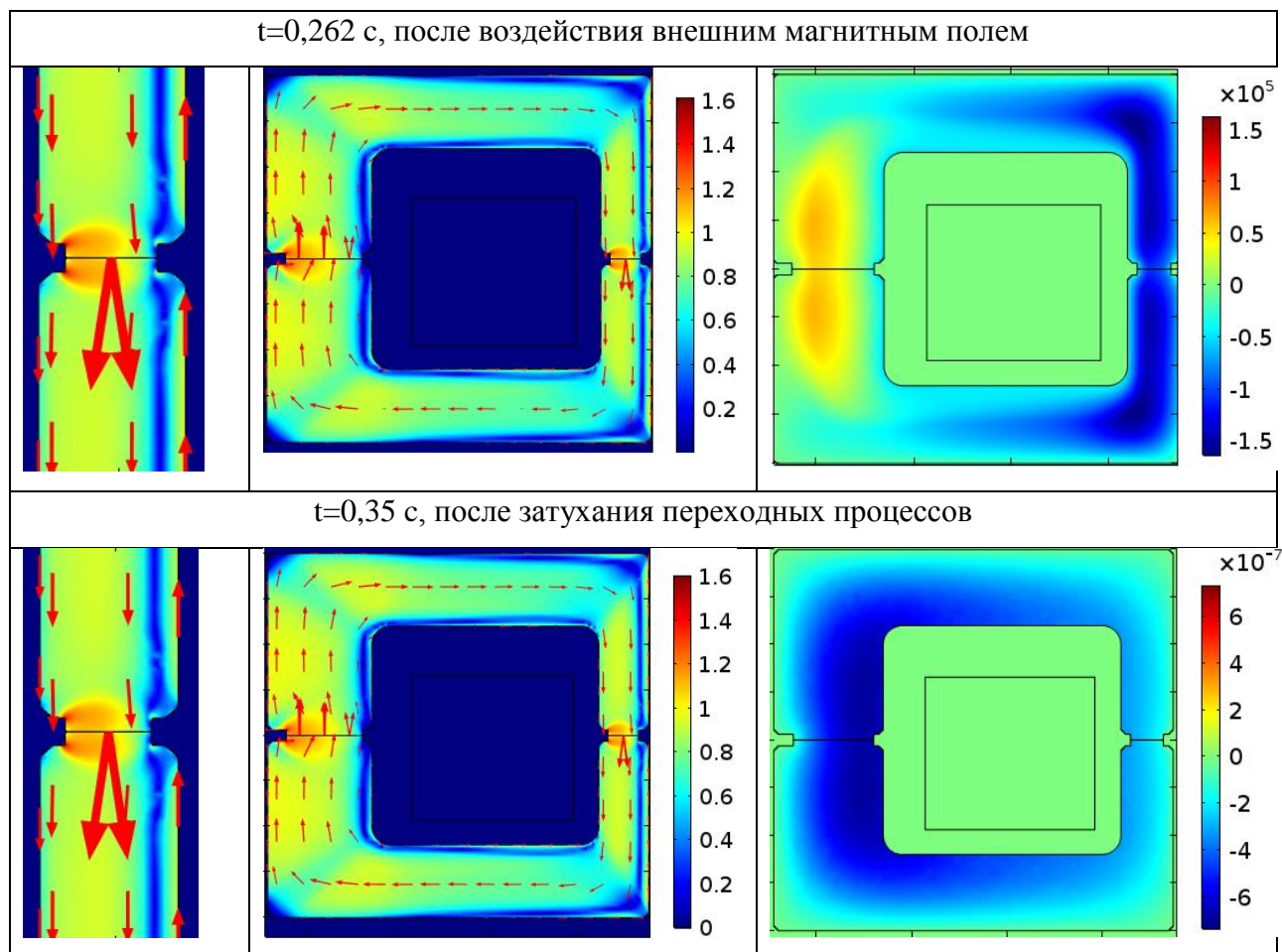
$t=0,2606$  с, прекращение внешнего магнитного поля



$t=0,261$  с, после воздействия внешним магнитным полем



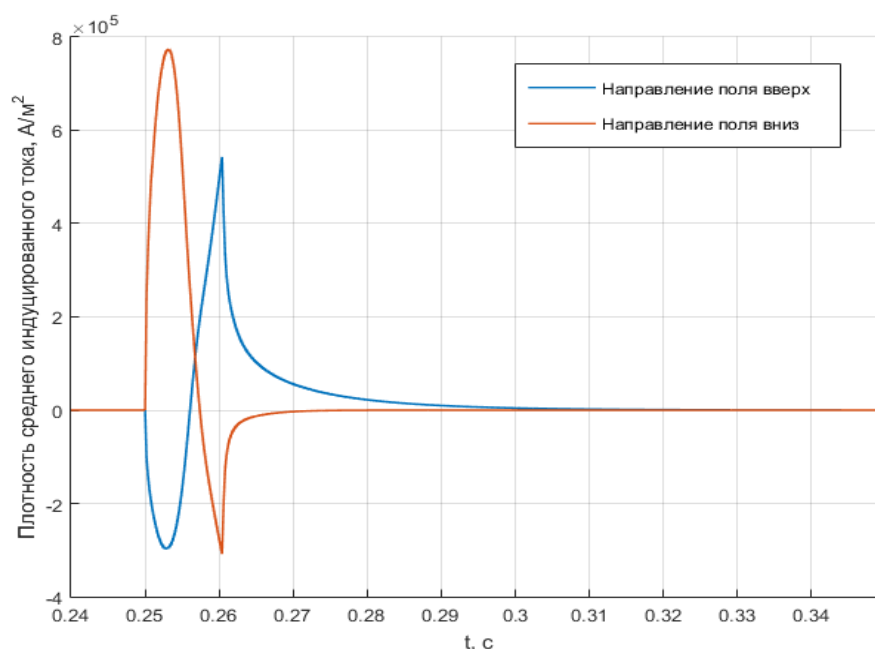




*Рис. 22. Поверхностные распределения модуля магнитной индукции и плотности индуцированного тока в разные моменты времени. Внешнее магнитное поле направлено вниз.*

Приведенные выше рассуждения описывают локальные процессы, происходящие в ЭМП, под действием внешнего магнитного поля. На рис. 23 изображен график изменения средней плотности индуцированных токов в статоре для двух направлений внешнего магнитного поля. Первый всплеск тока характеризует возникновение первой волны индуцированного тока. Как было выяснено по контурным распределениям, на пике внешнего магнитного поля в момент времени  $t=0,2552$  с возникает противоположная волна индуцированных токов (из-за уменьшения магнитного поля). Всплеск второй волны срезан затухающей первой волной. Видно, что значение пика положительного индуцированного тока больше значения пика отрицательного. Это связано с направлением поля во внешней части ЭМП, направлено вниз. Положительные индуцированные токи вызывают магнитное поле, направленное вверх. Поэтому всплеск этого индуцированного тока больше и дольше затухает по сравнению с отрицательным током, стремясь противодействовать изменению магнитного потока во внешней части ЭМП. Магнитное поле, созданное отрицательными индуцированными токами сонаправлено с магнитным полем во внешней части ЭМП.

Всплеск этого тока меньше и затухает быстрее по сравнению с индуцированным током первой волны.



*Рис. 23. Зависимость средней плотности индуцированных токов в статоре от времени (амплитуда внешнего магнитного поля 80 мТл).*

Как и в предыдущем разделе со стационарным внешним магнитным полем, рассмотрим несколько значений амплитуды магнитной индукции в обоих направлениях. На рис. 24 показан график зависимости магнитной силы от времени для каждого значения магнитного поля (знак «-» обозначает поле, направленное вниз).

При воздействии внешним полем, направленным вверх, и увеличении амплитуды внешнего поля, магнитная сила уменьшается (рис. 24) из-за размагничивания внешнего кольца ЭМП. При последующем уменьшении амплитуды внешнего поля сила начинает расти в связи с увеличением магнитной индукции в ЭМП. После отключения поля, магнитная сила уменьшается и выходит на постоянное значение из-за затухания индуцированных токов. И противоположный процесс происходит с внешним магнитным полем, направленным вниз.

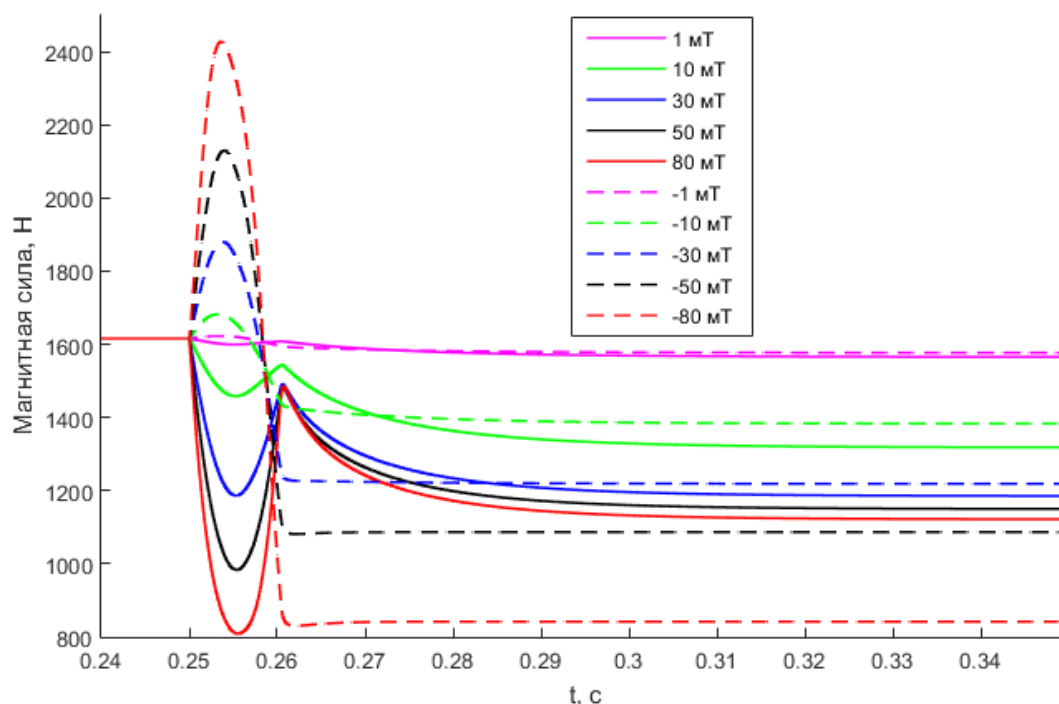


Рис. 24. Зависимость магнитной силы от времени для разных амплитуд и направлений внешнего магнитного поля.

Рассмотрим магнитную силу в момент времени  $t=0,35$  с (когда значение уже вышло на постоянное) в зависимости от амплитуды внешнего магнитного поля, рис. 25. Внешнее магнитное поле любого направления уменьшает силу притяжения якоря к статору, начальный уровень магнитной силы обеспечивается процессом намагничивания, с увеличением амплитуды внешнего магнитного поля сила становится меньше, характер зависимостей для двух направлений отличается. При внешнем поле, направленном вверх, с амплитудой больше 30 мТл спад магнитной силы значительно замедляется. Этот результат хорошо иллюстрирует график средней плотности индуцированных токов (рис. 23), рассмотренный выше. Скачок индуцированного тока второй волны с увеличением амплитуды внешнего поля срезается больше, чем при небольших амплитудах. На рис. 26 показана зависимость средней плотности индуцированных токов от времени в статоре для внешнего магнитного поля с амплитудой 10 мТл. Видно, что скачки тока при поле, направленном вверх, больше, чем при обратном поле.

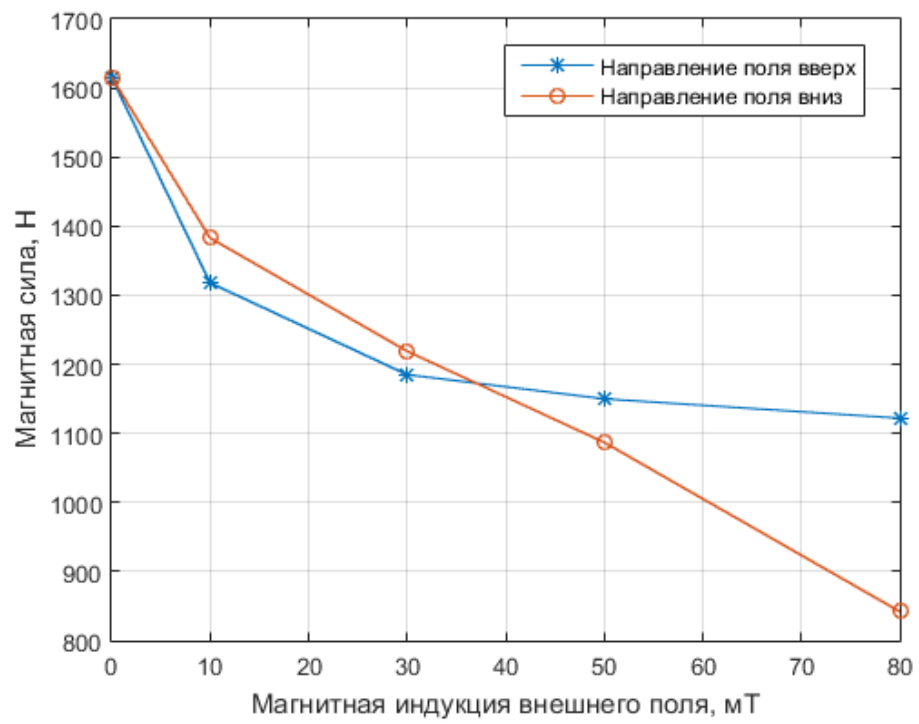


Рис. 25. Зависимость магнитной силы от амплитуды внешнего магнитного поля.

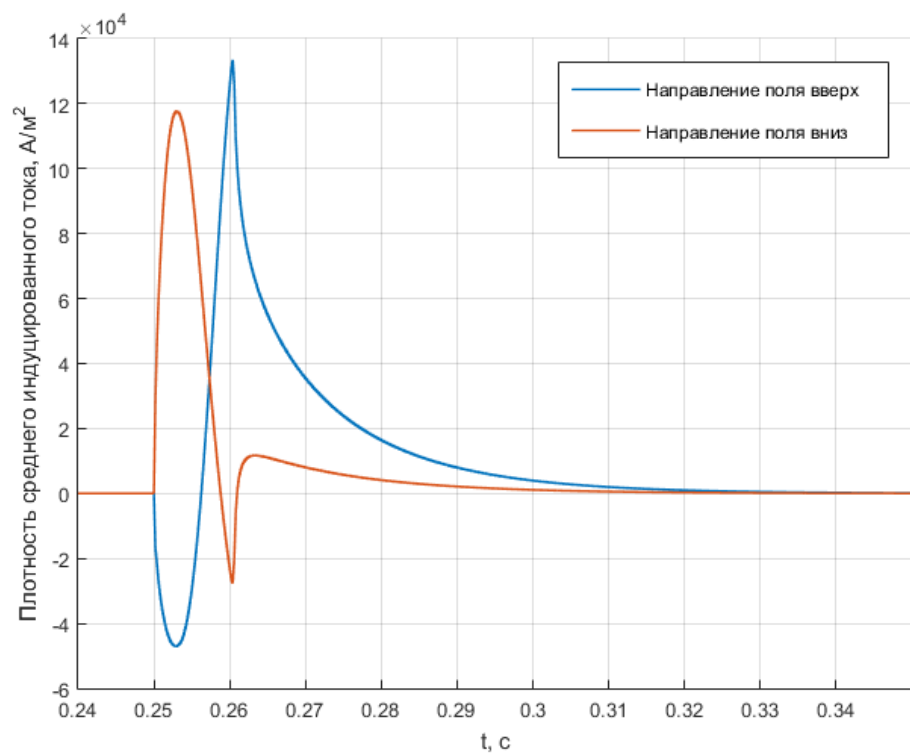


Рис. 26. Зависимость средней поверхностной плотности индуцированных токов в статоре от времени при внешнем магнитном поле амплитуды 10 мТл.

### **5.2.2 Влияние внешнего импульсного магнитного поля на ЭМП с замкнутой накоротко катушкой**

Теперь будем воздействовать на ЭМП таким же импульсом (рис. 20), но в случае с катушкой, замкнутой накоротко. Этот вариант характерен тем, что под действием импульса внешнего магнитного поля, в замкнутой катушке будет возникать индуцированный ток, влияющий на состояние ЭМП.

В моделировании индуцированный ток рассчитывался по среднему значению напряжения внутри катушки, которое выражается через вихревое электрическое поле  $E$ , проинтегрированное вдоль катушки.

Рассмотрим несколько значений амплитуды магнитной индукции. На рис. 27 показана зависимости магнитной силы от времени для каждого значения магнитного поля (знак «-» поле, направленное в отрицательном направлении оси  $z$ ). При сравнении с задачей с разомкнутой катушкой (рис. 24) видно отличие, обусловленное наличием индуцированного тока в катушке.

При воздействии внешним полем, направленным вверх, с увеличением амплитуды внешнего поля, сила (рис. 27) уменьшается из-за размагничивания внешнего кольца ЭМП. При уменьшении амплитуды внешнего поля сила начинает расти в связи с увеличением магнитной индукции в ЭМП. После отключения поля, магнитная сила уменьшается и выходит на постоянное значение после затухания индуцированных токов. Противоположный процесс происходит с внешним магнитным полем, направленным вниз. Качественно форма зависимости осталась прежней, но на постоянное значение сила выходит заметно дольше.

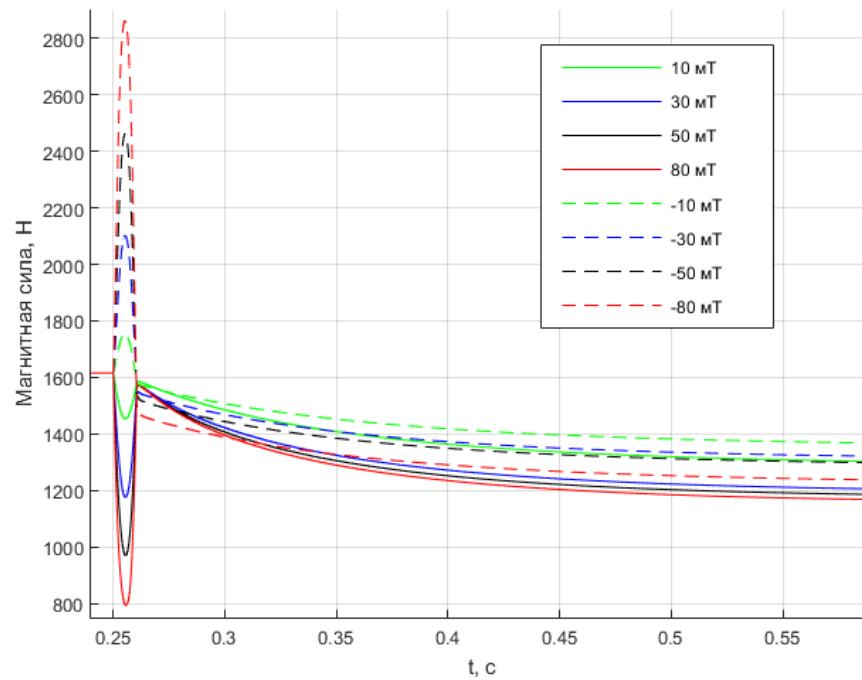


Рис. 27. Зависимость магнитной силы от времени для каждого значения магнитного поля (знак «-» обозначает поле, направленное вниз).

Построим график зависимости величины магнитной силы (в момент времени  $t=0,6$  с) от значения амплитуды внешнего поля (рис. 28).

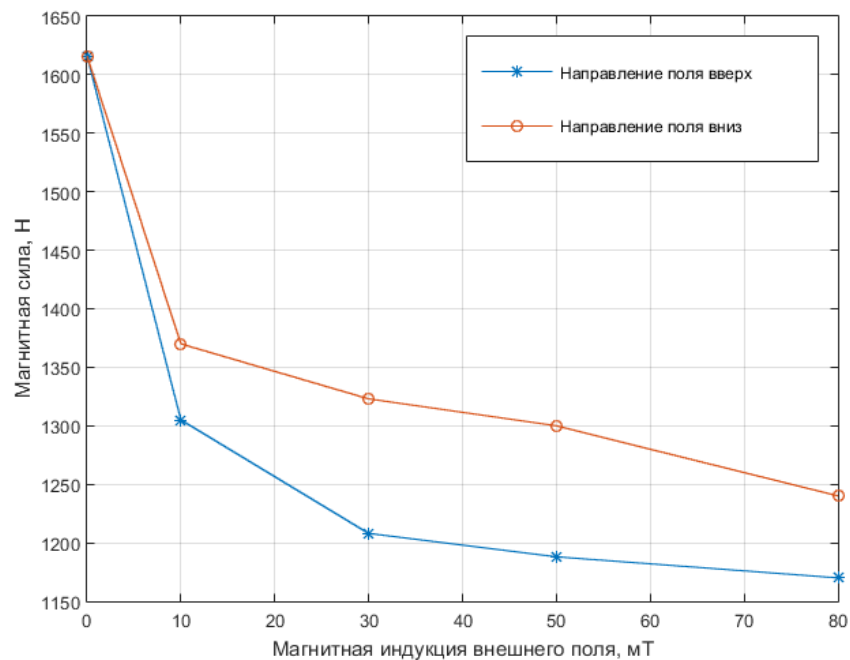
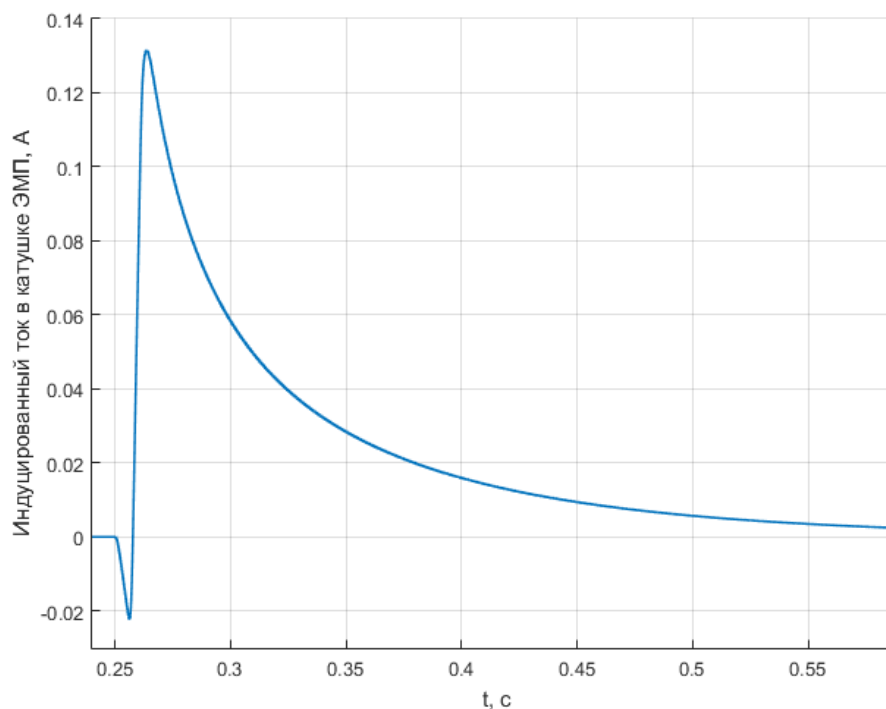


Рис. 28. Зависимость величины магнитной силы от значения амплитуды внешнего магнитного поля.

При внешнем поле, направленном вверх, в ЭМП происходят такие же процессы, как и в случае с разомкнутой катушкой. В самой же катушке возникает индуцированный ток, вызванный индуцированным напряжением (рис. 29). Сначала ток в катушке сонаправлен с индуцированным током первой волны в статоре и якоре. Величина тока в катушке

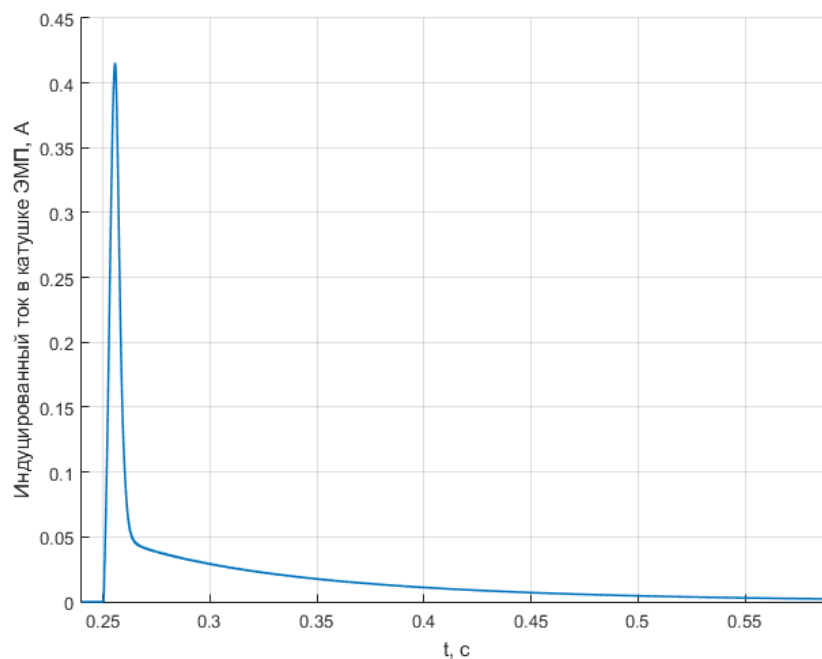
уменьшается по модулю и достигает нулевого значения в момент исчезновения первой волны индуцированного тока в ЭМП. Далее ток в катушке меняет свой знак, достигает своего максимума и медленно затухает. Что и влияет на медленный выход магнитной силы на постоянное значение. Характер изменения индуцированного тока в катушке повторяет изменение индуцированных токов в статоре и якоре. Поэтому форма зависимости магнитной силы от амплитуды внешнего магнитного поля не изменилась. Но с увеличением амплитуды внешнего магнитного поля, индуцированные токи в катушке оказывают большее влияние на магнитную силу, увеличивая ее (в сравнении с разомкнутой катушкой).



*Рис. 29. Изменение во времени индуцированного тока в катушке ЭМП, внешнее магнитное поле направлено вверх.*

В случае, когда внешнее магнитное поле направлено вниз, характер зависимости магнитной силы (рис. 28) отличен от ситуации с разомкнутой катушкой (рис. 25).

В катушке ЭМП возникает индуцированный ток, не меняющий свое направление (рис. 30). И его направление совпадает с направлением первой волны индуцированных токов в статоре и якоре, уменьшая внешнее магнитное поле. При увеличении амплитуды внешнего магнитного поля ток в катушке растет. С уменьшением амплитуды внешнего магнитного поля ток в катушке падает и постепенно затухает.



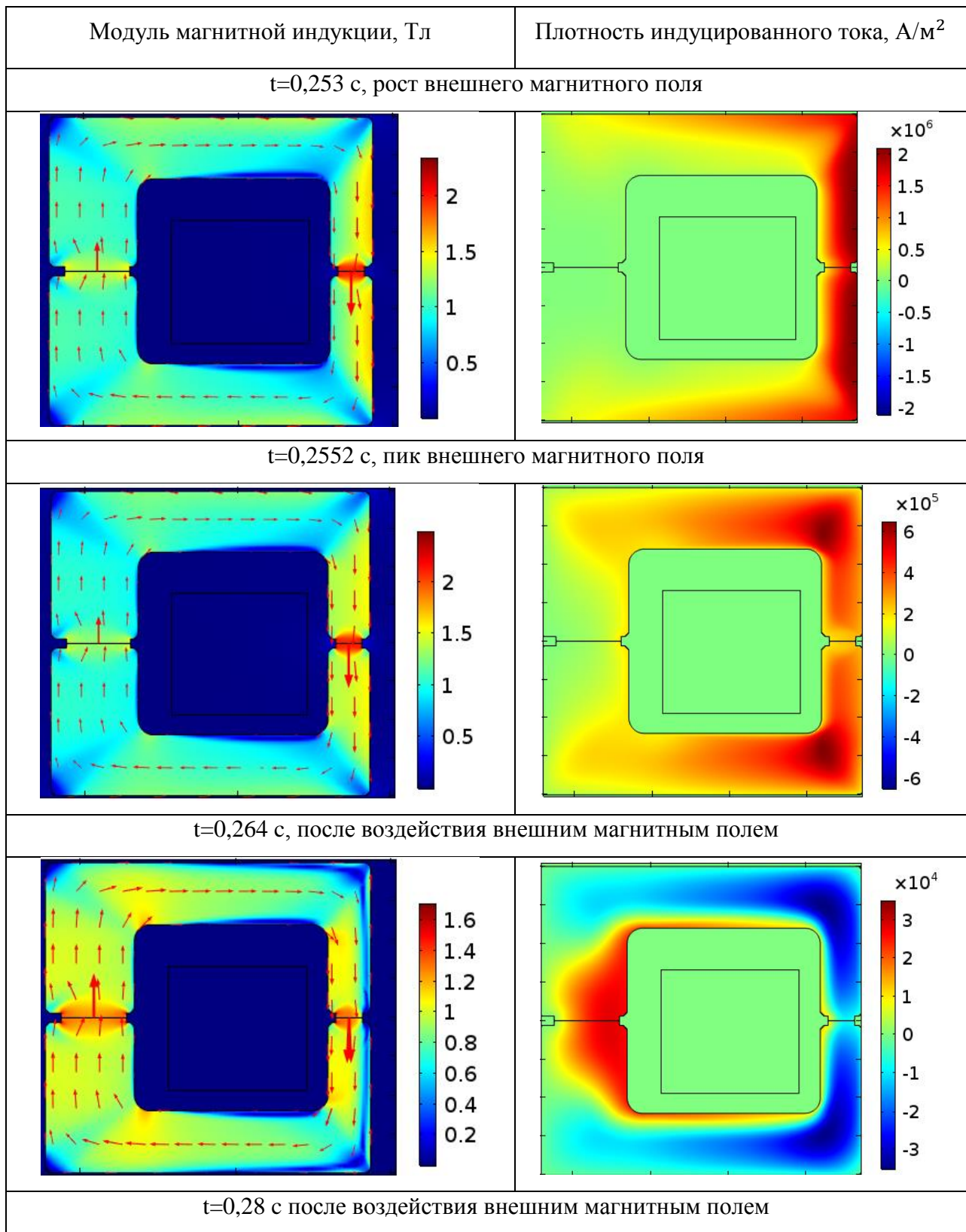
*Рис. 30. Изменение во времени индуцированного тока в катушке ЭМП, внешнее магнитное поле направлено вниз.*

Для понимания процессов, происходящих в ЭМП, воспользуемся контурными распределениями плотности индуцированного тока в разные моменты времени (рис. 31). Плотность тока в катушке рассматривать не будем, т.к. порядок величины этого тока отличен от индуцированных токов в статоре и якоре, что будет затруднять восприятие графиков.

Характер процессов, происходящих в ЭМП, изменяющих магнитную индукцию в нём аналогичен рассматриваемым процессам с разомкнутой катушкой. Поэтому остановимся на особенностях, к которым привело влияние индуцированного тока в катушке.

Первая волна индуцированных токов в статоре и якоре (рис. 31) замедляется при распространении к внутренней поверхности ЭМП. Поэтому внутреннее кольцо не размагничивается на внутренней поверхности (в сравнении с разомкнутой катушкой рис. 22). После появления второй волны индуцированных токов две волны сталкиваются ( $t=0,264$  с), а внутренняя поверхность внешнего кольца намагничивается. Вторая волна затухает быстрее, оставляя только первую волну индуцированных токов, сонаправленную с индуцированным током в катушке.





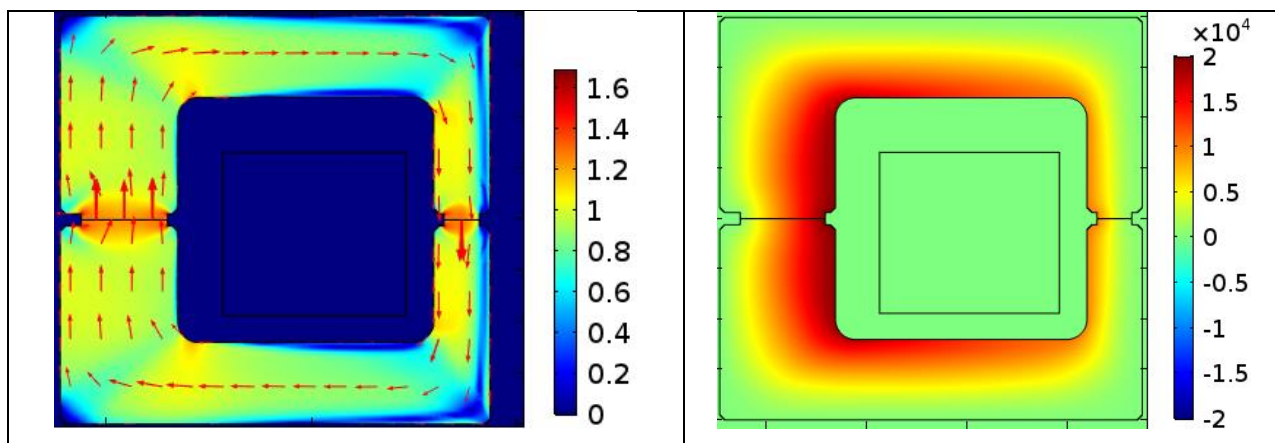


Рис. 31. Поверхностные распределения модуля магнитной индукции и плотности индуцированного тока в разные моменты времени. Внешнее магнитное поле направлено вниз.

В связи с этим характер зависимости магнитной силы от амплитуды внешнего поля, направленного вниз, изменился (в сравнении с разомкнутой катушкой на рис. 32). И теперь повторяет форму зависимости для поля, направленного вверх.

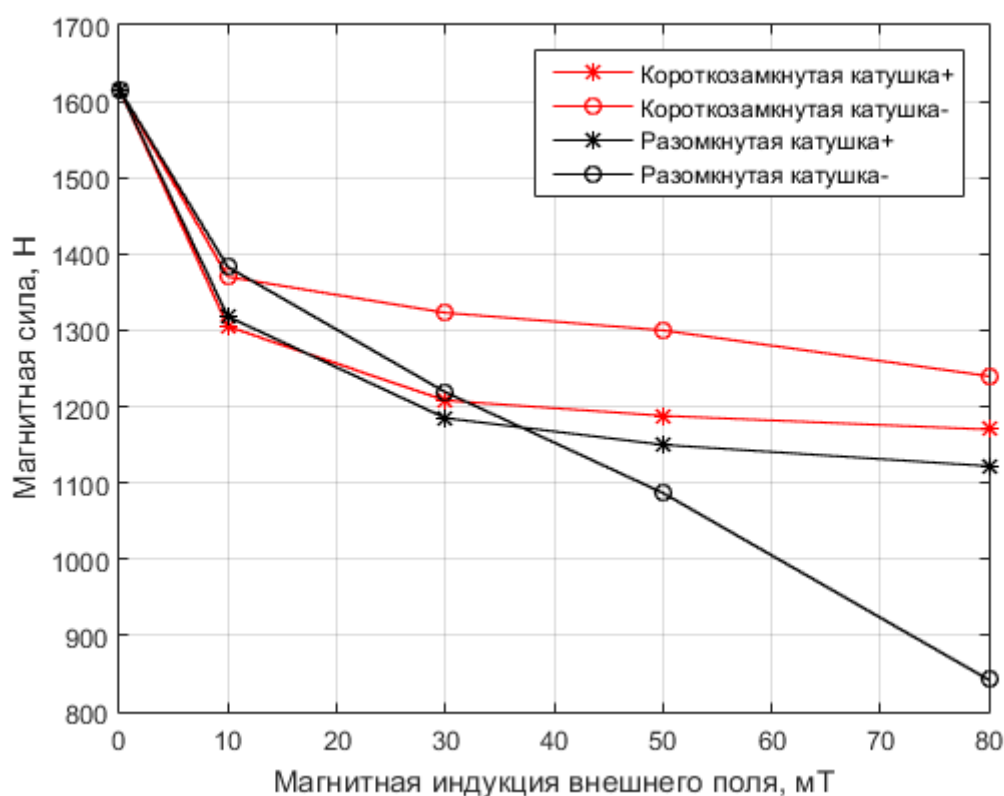


Рис. 32. Зависимость магнитной силы от амплитуды внешнего поля.

## 6 Трехмерная постановка задачи

Рассмотрим моделирование трехмерной задачи. Это дает возможность рассмотреть воздействие на ЭМП внешнего магнитного поля любой ориентации за счет задания второй

компоненты поля (поперечной к оси привода). В двухмерной постановке это принципиально невозможно сделать.

Расчет трехмерной задачи усложняется значительным увеличением числа элементов (минимальный размер элемента равен 10 мкм (величина зазора), а размер модели порядка 10 см, что больше на 4 порядка). Расчет такой задачи требует дополнительных компьютерных ресурсов (оперативной памяти), которых на данный момент нет, поэтому для возможности решения задачи размер элементов был значительно увеличен по сравнению с двумерной задачей рис. 33.

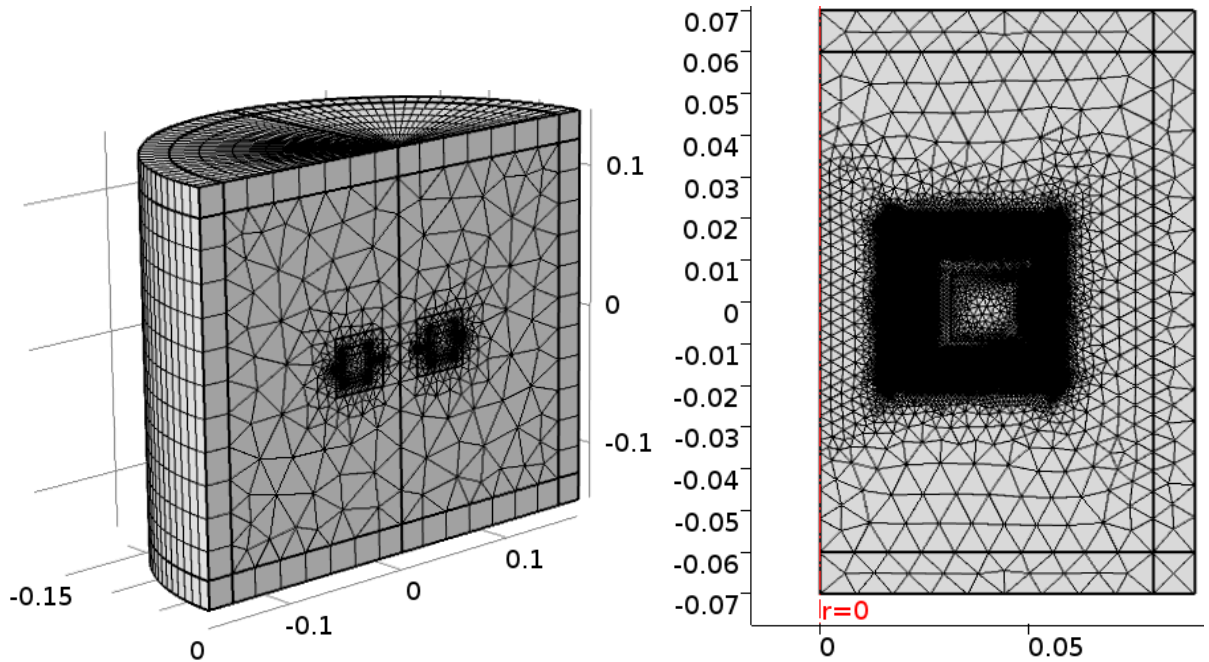


Рис. 33. Конечно-элементная модель (слева – половина трехмерной модели, справа – двумерная).

Особенностью трехмерной задачи является то, что воздушный зазор между статором и якорем не моделируется, а используется приближенное граничное условие, заменяющее реальный зазор:

$$\vec{n} \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = \nabla_t \times \left( h \frac{\vec{B}_n}{\mu_0 \mu_r} \right), \quad (13)$$

$$\vec{B}_n = \nabla_t \times \vec{A},$$

где  $\vec{H}_1, \vec{H}_2$  – магнитное поле, на поверхностях, между которыми расположен зазор,  $h$  – величина зазора,  $\vec{B}_n$  – нормальная компонента магнитной индукции,  $\vec{A}$  – векторный магнитный потенциал,  $\mu_0 \mu_r$  – магнитные проницаемости.

Это сделано для уменьшения общего числа элементов сетки.

Уравнение (13) соответствует условию скачка поля  $\mathbf{H}$  в зазоре. Такая замена реального зазора не учитывает краевые эффекты на границах буртиков, но из-за малости величины

зазора этот эффект не оказывает большого влияния. Правомерность данной замены была проверена при сравнении с двумерной задачей, решенной ранее.

Постановка трехмерной задачи аналогична рассматриваемой ранее двумерной задачи. Решение состоит из двух шагов: намагничивания ЭМП и воздействия внешним магнитным полем.

Первый шаг: намагничивание производится длительным импульсом электрического тока в катушке (рис. 34). Амплитуда тока выбрана таким образом, чтобы магнитная сила в состоянии остаточной намагниченности совпала с ее значением для двумерной задачи.

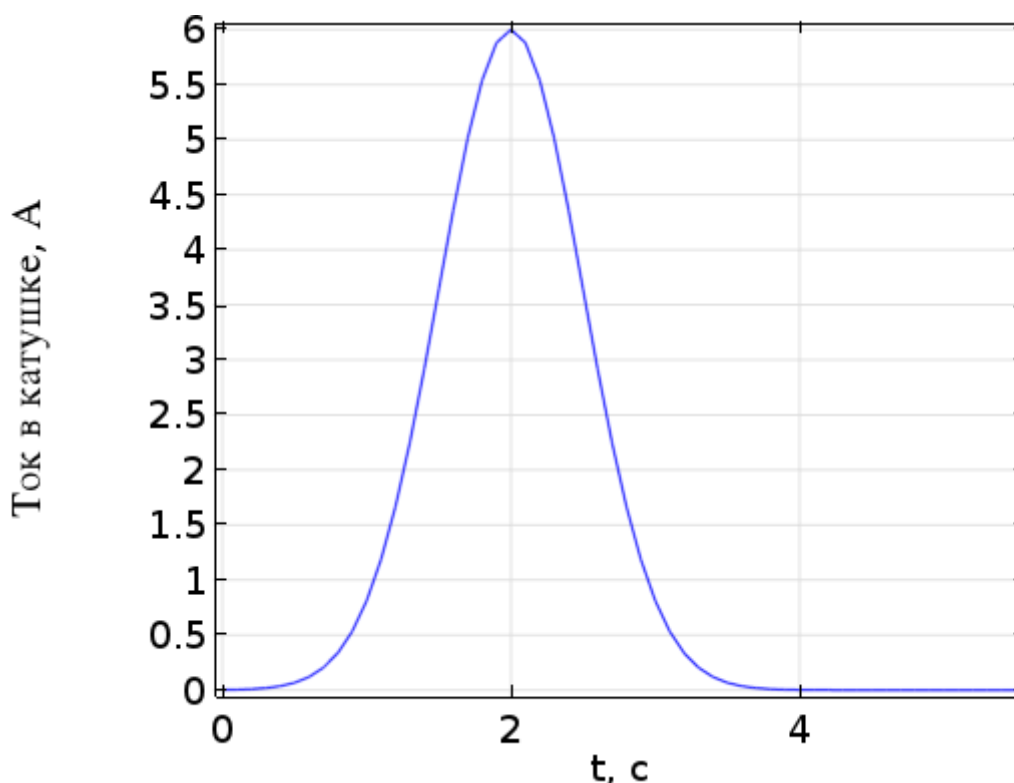


Рис. 34. Намагничивающий импульс тока в катушке ЭМП в трехмерной задаче.

Для начала проведем сравнение трехмерной модели с двумерной на примере воздействия на ЭМП внешним стационарным магнитным полем, направленным вдоль его оси. Импульс внешнего поля обозначен на рис. 35. На рис. 36 представлены контурные графики распределения модуля магнитной индукции в половине модели при внешнем магнитном поле двух направлений (красными стрелками обозначено направление внешнего магнитного поля – вверх и вниз) амплитуды 80 мТл.

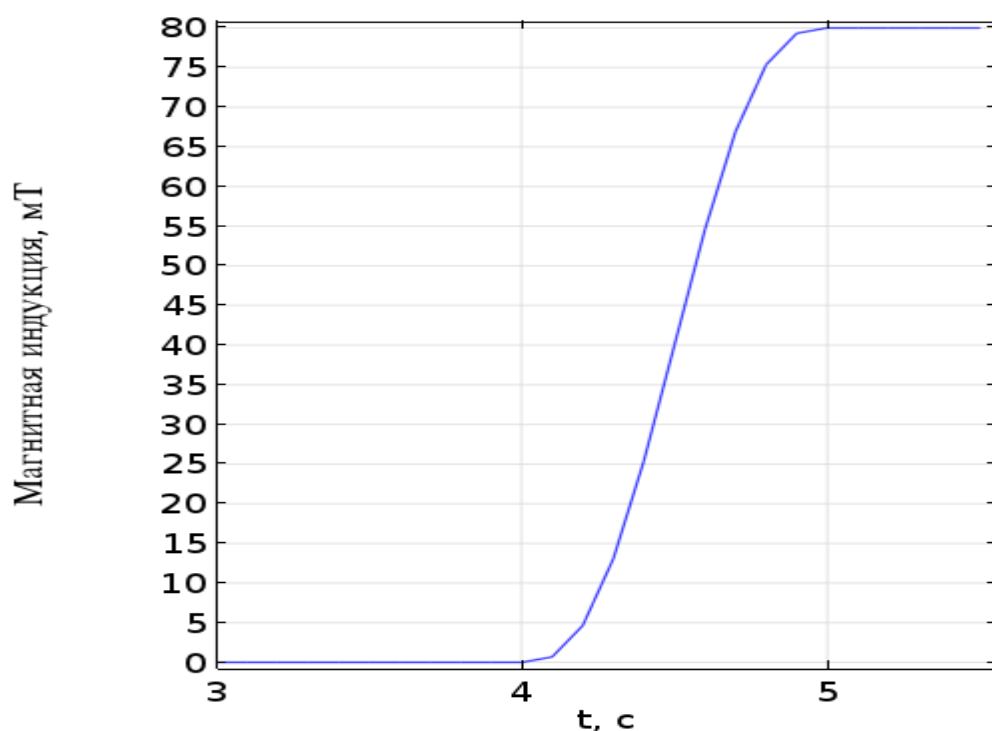


Рис. 35. Зависимость магнитной индукции внешнего поля от времени

Time=5.5 s Volume: Magnetic flux density norm (T)

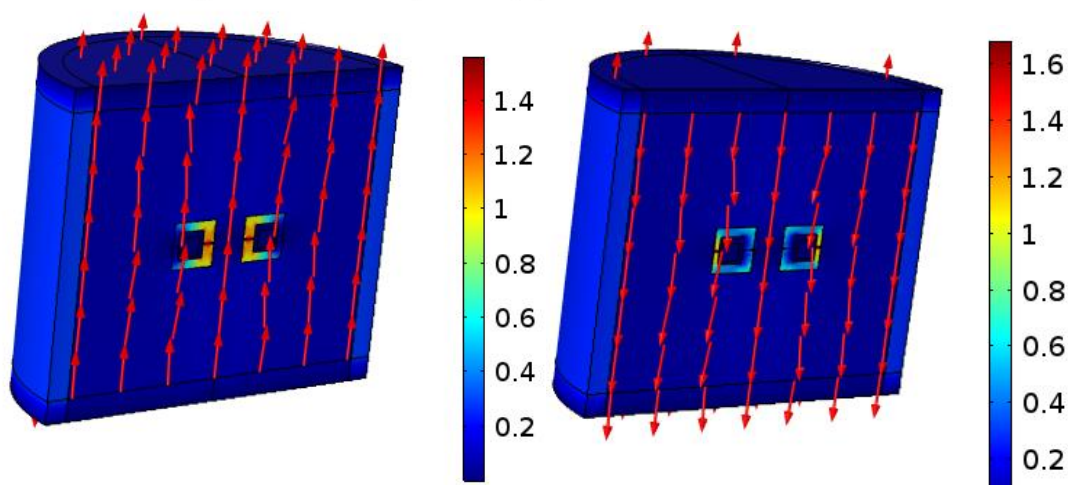


Рис. 36. Контурные графики поверхностного распределения модуля магнитной индукции в модели (слева – внешнее поле направлено вверх, справа – вниз, амплитуда 80 мТл).

На рис. 37 слева показаны графики рис. 36 в другом масштабе для сравнения с двумерной задачей (справа). Качественно графики совпадают, намагничивание происходит в соответствующей области ЭМП согласно направлению внешнего магнитного поля. Грубая сетка трехмерной модели не позволяет более точно рассчитать локальные характеристики поверхностных распределений. Поэтому сравним две задачи по интегральному параметру – магнитной силе. Значения магнитной силы также представлены на рис. 37. Рассчитанные величины показывают хорошее совпадение задач (погрешность составляет 5%).



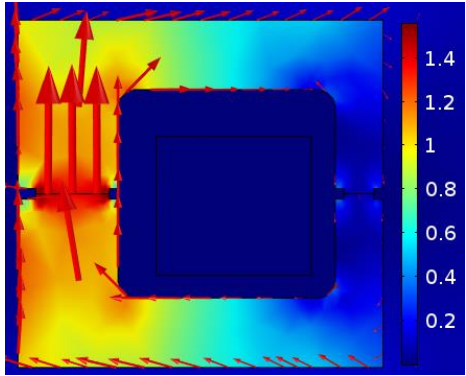
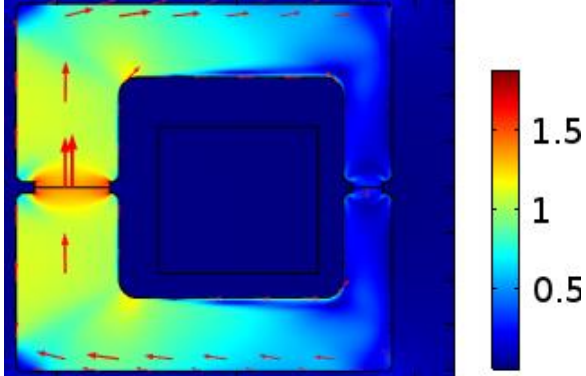
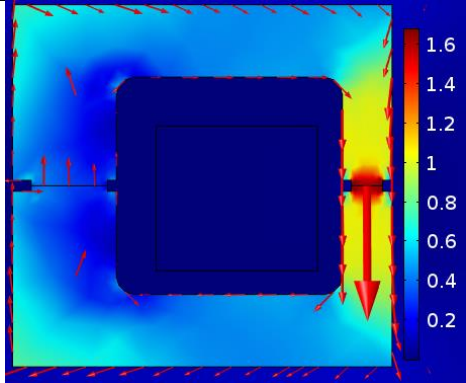
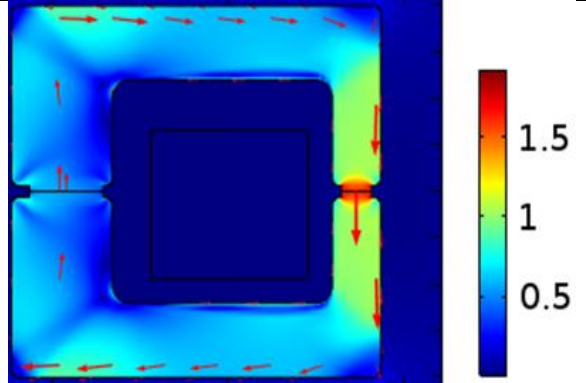
Направление внешнего магнитного поля 80 мТл	Трёхмерная задача	Двумерная задача
Вверх		
Магнитная сила, Н	873	883
Вниз		
Магнитная сила, Н	1217	1279

Рис. 37. Контурные графики поверхностного распределения модуля магнитной индукции (Тл) в ЭМП и значение магнитной силы для каждого из представленных случаев.

Рассмотрим влияние поперечной компоненты внешнего магнитного поля амплитуды 80 мТл на намагниченный ЭМП. На рис. 38 представлен график поверхностного распределения модуля магнитной индукции в модели после выхода магнитной силы на постоянное значение. Красными стрелками показано направление магнитной индукции в модели.

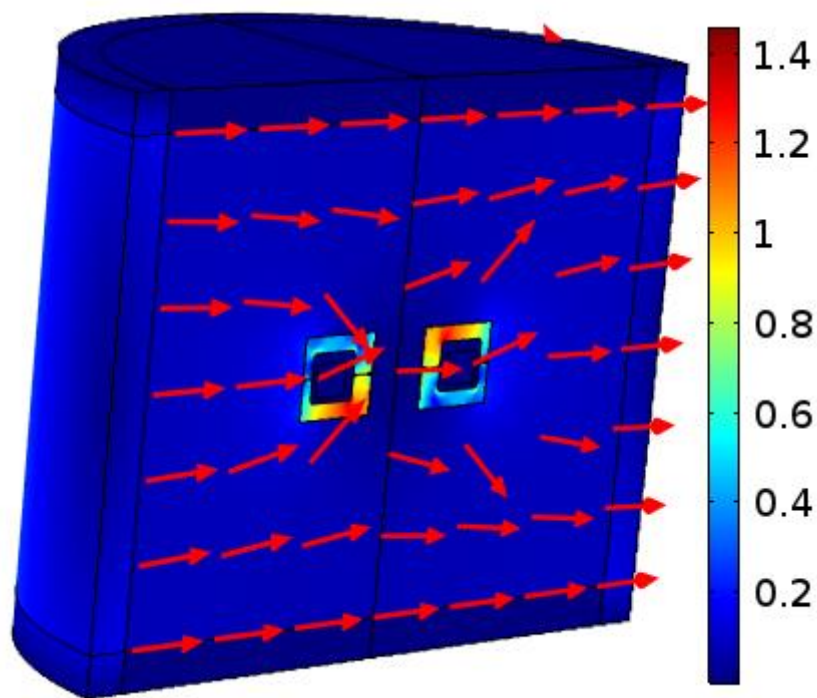
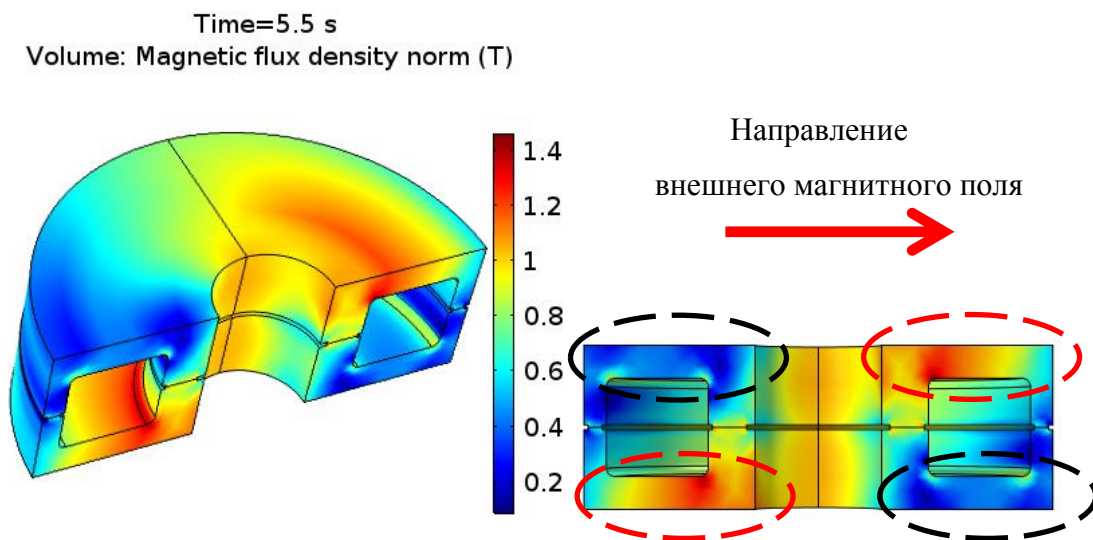


Рис. 38. Контурный график поверхностного распределения модуля магнитной индукции (Тл) в модели при поперечном внешнем магнитном поле амплитуды 80 мТл.

Рассмотрим детальней процессы, происходящие в ЭМП. На рис. 39 представлены контурные графики поверхностного распределения модуля магнитной индукции в ЭМП (в масштабе рис. 38). Магнитный поток, сформированный в ЭМП за счет остаточной намагниченности, стремится изменить свое направление по направлению внешнего магнитного поля. В свою очередь части ЭМП, в которых направление магнитного поля совпадает с направлением внешнего поля (отмечены красным контуром на рис. 39), намагничиваются. В местах, где направление противоположно (черный контур рис. 39), размагничиваются.



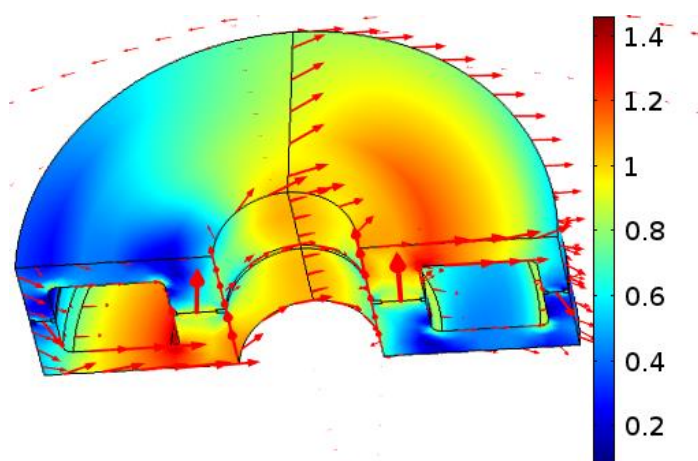


Рис. 39. Контурные графики поверхностного распределения модуля магнитной индукции в ЭМП при поперечном внешнем магнитном поле (Тл).

Для получения зависимости изменения магнитной силы от амплитуды внешнего магнитного поля поперечного направления были решены задачи с амплитудами внешнего поля 10, 30, 50 мТл. Полученная зависимость представлена на рис. 40. Сравнивая полученный результат с ранее приведенными данными, делаем вывод, что поперечное внешнее магнитное поле значительно сильнее уменьшает магнитную силу. Величина магнитной силы определена величиной магнитной индукции на поверхности соприкосновения статора и якоря. А под действием поперечного магнитного поля намагниченность поверхности соприкосновения (буртиков) смещается в направлении к внешней поверхности (вниз и вверх).

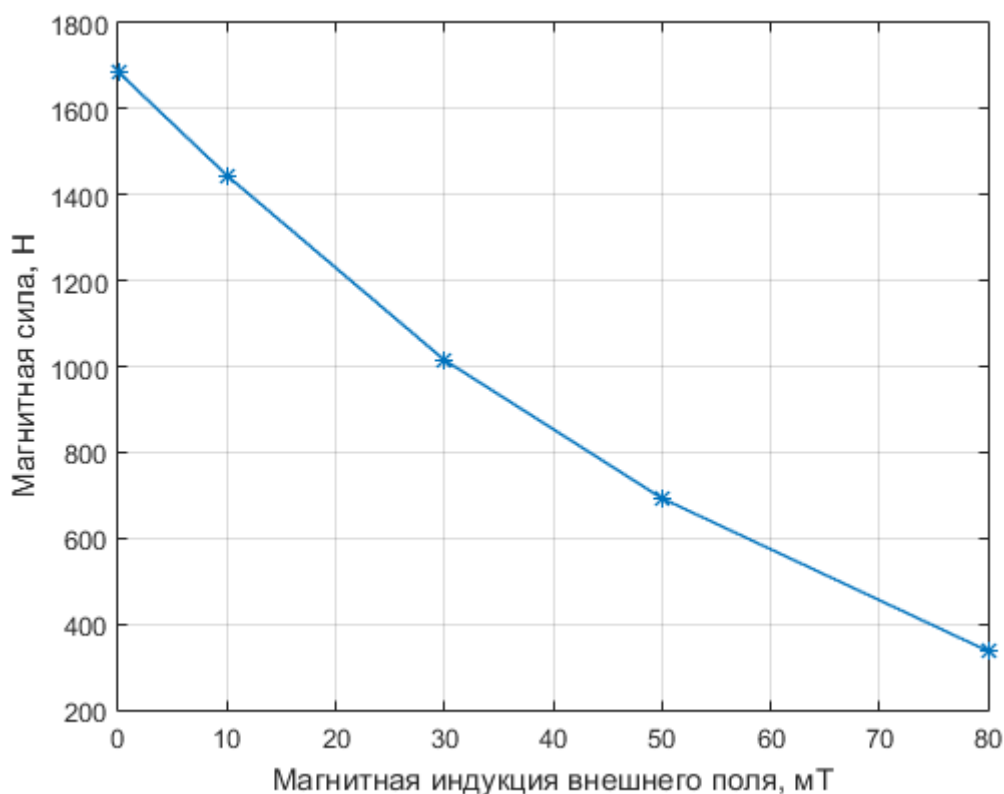


Рис. 40. Зависимость магнитной силы от амплитуды внешнего поля.



## 7 Выводы

Из полученных результатов работы можно сделать следующие выводы:

1. В механостатической и динамической задачах намагничивания распределения остаточной «намагниченности» совпадают при задании в первой тока, соответствующего току домагничивания динамической задачи. Также совпадают силовые характеристики ЭМП - остаточная магнитная сила.
2. Стационарное внешнее магнитное поле воздействует на магнитную систему, уменьшая магнитную силу. Величина изменения магнитной силы зависит не только от амплитуды поля, но и от его направления. Поле, действующее перпендикулярно оси ЭМП, значительно сильнее размагничивает (уменьшает магнитную силу) ЭМП по сравнению с полем, направленным по оси. Зависимости остаточной магнитной силы от амплитуды внешнего магнитного поля качественно схожи, но и имеют количественные различия в зависимости от направления действия поля.
3. При воздействии внешним импульсным полем величина размагничивания зависит от способа подключения катушки. ЭМП с короткозамкнутой катушкой размагничивается слабее, чем с разомкнутой. При больших амплитудах поля, для случая с короткозамкнутой катушкой, влияние направления осевого поля на остаточную магнитную силу незначительно (различие магнитных сил для амплитуды поля 80 мТл составляет меньше 10%). В случае разомкнутой катушки различие существенно больше.
4. Применение грубой сетки и приближенного граничного условия для зазора не сказывается существенно на точности определения магнитной силы (погрешность составляет около 5%).

## 8 Список литературы

1. S.Kh. Shchuchinskii, V.V. Ivanoy, M.G. Bisyakova, «Evaluation of the external magnetic field induced by a valve with electromagnetic drive», Chemical and Petroleum Engineering, 1991.
2. N.H. Vrijsen, J.W. Jansen, E.A. Lomonova, «Prediction of magnetic hysteresis in the force of a prebiased E-core reluctance actuator», IEEE Transactions on Industry Applications, 2014.
3. S.V. Stankevich, G.A. Shvetsov, «Ultimate kinematic characteristics of rail electromagnetic launchers with metal armatures in an external magnetic field», Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2014.
4. M.T.N. Mohammad, C.N. Booth, P. Hodgson, L. Howlett, P.J. Smith, S.M. Sharkh, «Design considerations and performance of a PM linear actuator in a radiation environment», IET Conference Publication, 2008.
5. V.F. Matyuk, V.R. Churilo, A.V. Strelyukhin, «Distribution of magnetic induction along hollow core of round section in constant homogeneous magnetic field», Russian Electrical Engineering, 2010.
6. V.F. Matyuk, V.R. Churilo, A.V. Strelyukhin, «Numerical simulation of the magnetic state of a ferromagnet located in a nonuniform stationary magnetic field using the three-dimensional integral equation method: II. Ferromagnetic disk in the magnetic field of a superposed solenoid», Russian Journal of Nondestructive Testing, 2003.
7. S. Koroglu, P. Sergeant, N. Umrkan, «Comparison of analytical, finite element and neural network methods to study magnetic shielding», Simulation Modelling Practice and Theory, 2010.
8. Z. Linli, Z. Jianping, Z. Xiaojing, «Multi-field coupling behavior of simply-supported conductive plate under the condition of a transverse strong impulsive magnetic field», Acta Mechanica Solida Sinica, 2006.
9. Y. Gao, B. Xu, «Dynamic behaviors of conductive circular plate in time-varying magnetic fields», Acta Mechanica Solida Sinica, 2010.
10. M. Kobayashi, Y. Ishikawa, S. Kato, «Magnetizing characteristics of circular cylinders in perpendicularly applied magnetic field», IEEE Transactions on Magnetics, 1996.
11. D. C. Jiles, D. L. Atherton, «Theory of ferromagnetic hysteresis», Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1986.
12. И. С. Пустовойтенко, «Динамическая модель электромагнитного привода с учетом гистерезиса», ВКР, СПбГУ, 2016.